

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**HAVA KONUŞLU MİNYATÜR YANILTMA PLATFORMLARININ
GÖVDE YAPISINDA FAZ DİZİ ANTEN KULLANILARAK RADAR
KESİT ALANININ ARTTIRILMASININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

ÖZGE BAYRI ÖTENKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**HAVA KONUŞLU MİNYATÜR YANILTMA PLATFORMLARININ
GÖVDE YAPISINDA FAZ DİZİ ANTEN KULLANILARAK RADAR
KESİT ALANININ ARTTIRILMASININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

ÖZGE BAYRI ÖTENKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. AHMET GÜNGÖR PAKFİLİZ

ANKARA - 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Özge BAYRI ÖTENKAYA tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 27 / 03 / 2023

Tez Adı: Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma Platformlarının Gövde Yapısında Faz Dizi Anten Kullanılarak Radar Kesit Alanının Arttırılmasının İncelenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç.Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz, Başkent Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Kerim Demirbaş, Başkent Üniversitesi

.....

Dr.Öğr.Üyesi Aykut Kalaycıoğlu, Ankara Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı : Özge BAYRI ÖTENKAYA

Öğrencinin Numarası : 22020123

Anabilim Dalı : Elektrik/Elektronik Mühendisliği

Programı : Elektrik/Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Doç.Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz

Tez Başlığı : Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma Platformlarının Gövde Yapısında Faz Dizi Anten Kullanılarak Radar Kesit Alanının Arttırılmasının İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 87 sayfalık kısmına ilişkin, 05/04/2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı

Doç.Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz

Bu tezi savunma sanayisinde yıllarını büyük bir fedakârlıkla geçiren ve ülkemizin savunma sektöründe ilerlemesine katkı sağlayan tüm tasarım mühendislerine ithaf ediyorum.

Özge BAYRI ÖTENKAYA

Ankara -2023

TEŞEKKÜR

Sayın Doç. Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz 'e çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

Numesys firmasından Alp Kaçar ve Güven Eylen'e analizleri yapmamda gösterdikleri özveri ve yardımları için teşekkür ederim.

Sonsuz sevgi ve desteğiyle yanımda olan, canım ailem ve sevgili eşime her zaman yanımda oldukları için teşekkür ederim.



ÖZET

Özge BAYRI ÖTENKAYA

HAVA KONUŞLU MİNYATÜR YANILTMA PLATFORMLARININ GÖVDE YAPISINDA FAZ DİZİ ANTEN KULLANILARAK RADAR KESİT ALANININ ARTTIRILMASININ İNCELENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

Geçmiş yıllardan bu yana hava savunma sistemlerini güçlendirmek ve düşmanı yanıltmak için yoğun çalışmalar sürdürülmüştür. Elektronik karşı önlem ve aldatma kavramlarında tuzaklar çok önemli bir role sahiptir ve son birkaç yılda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. En etkileyici olanı minyatür hava konuşlu yanıltma platformu (MALD)'lardır. Savaş uçaklarının radar imzalarını ve uçuş profillerini taklit ederek düşman hava sahasına saldırı izlenimi vermek için kullanılırlar.

Ancak düşük radar kesit alanı (RKA) nedeniyle radar algılama olasılıkları savaş uçaklarından daha düşüktür. Bu nedenle, emisyon ve MALD sisteminin RKA'sı bir savaş uçağına benzemelidir. Bu çalışma, faz dizi antenler kullanarak MALD sistemlerinin RKA'sını arttırmak için bir yöntem sunmaktadır. Bu nedenle MALD platformunun yüzeyinin ANSYS HFSS kullanılarak faz dizili anten ile kaplanması için farklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Faz dizi anten ile kaplanan MALD sisteminin RKA'sı, savaş uçağının RKA'sı ile karşılaştırılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma Platformu, Radar Kesit Alanı, Faz Dizi Anten, Konformal Anten.

ABSTRACT

Özge BAYRI ÖTENKAYA

INCREASING THE RADAR CROSS SECTION USING PHASE ARRAY ANTENNA IN THE BODY STRUCTURE OF MINIATURE AIR-LAUNCHED DECOY PLATFORMS

Başkent University Institute Of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

2023

Since the past years, intensive work has been carried out to strengthen the air defense systems and to mislead the enemy. Decoys have a crucial role in the electronic countermeasure and deception concepts, and many works and developments have been realized over the past few decades. The most impressive one is the miniature air-launched decoy (MALD)s. They mimic the radar signatures and flight patterns of the fighters to create the appearance of an attack in enemy airspace.

However, they resemble the emission of the fighters; their radar detection probabilities are lower than fighters due to their low radar cross-section (RCS)s. Thus, the emission and the MALD system's RCS must resemble a fighter. This study presents a method for increasing the RCS of MALD systems by using phased array antennas. So, a different approach is developed for covering the surface of the MALD platform with a phased array antenna with using ANSYS HFSS. The increased MALD system's RCS has been compared with the fighter's RCS, and satisfactory results have been obtained.

KEY WORDS: Air Launched Decoy Platform, Radar Cross Section, Conformal Antenna, Phase Array Antenna.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÖNSÖZ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ	1
1.1.Radar Kesit Alanı	5
1.2. Literatürdeki Çalışmalar	14
2. HAVA KONUŞLU YANILTMA PLATFORMLARI	19
2.1.Çekilen Aldatma (Towed) Platformu	19
2.2.Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak (TALD) Platformu	21
2.3.Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma (MALD) Platformu	23
2.3.1.MALD Platform Analizi	25
3.ANTEN YAPILARI.....	39
3.1.Mikroşerit Anten.....	39
3.2. Baskı Dipol Anten	57
3.3. Papyon Anten.....	61
4.FAZ DİZİ ANTENLER.....	66
4.1.Lineer Diziler	68
4.2.Konformal Diziler	74
4.3.MALD Platformu üzerine Faz Dizi Anten Yapısının Uygulanması	76
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83

ÖNSÖZ

Son yıllarda, hava savunmada başarı elde etmek, düşman kuvvetlerini yanıltmak ve tuzağa düşürmek için hava savunma sistemlerinde birçok gelişme meydana gelmiştir. Hava operasyonlarında elde edilecek başarıyı arttırmak için yanıltma platformları geliştirilmiştir. Bu yanıltma platformlarının savaş uçaklarının radar imzalarını taklit edebilmesi için radar kesit alanının arttırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Türkiye’de özellikle havacılık sektöründeki ihtiyaçların ve gereksinimlerin incelenmesi sonucu, hava konuşlu yanıltma platformlarında radar kesit alanının arttırılması için faz dizi antenlerin kullanımının uygulanabilirliği incelenmek istenmiştir.

Bu çalışma, 4 ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, radar kesit alanı ve literatürdeki çalışmalardan oluşmaktadır. İkinci bölüm, hava konuşlu yanıltma platformlarının 3 farklı çeşidinden bahsetmekte minyatür hava konuşlu yanıltma platformunun analizler için seçilme sebebini vurgulamaktadır. Üçüncü bölüm, anten yapılarını anlatmaktadır ve bu kısımda 3 farklı anten çeşidi üzerinde analizler yapıp yanıltma platformuna uygulanması planlanan antenin seçilme sebeplerinden bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde ise tezin sonucu anlatılmakta ve gelecekteki çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

Bu kapsamda, Başkent Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Ahmet Güngör Pakfiliz tezin geliştirilmesi sürecinde büyük katkı sağlamıştır.

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. 1.5 GHz'de phi açılara göre monostatik radar kesit alanının dBm cinsinden sonucu.....	30
Tablo 2.2. 1,2,3 ve 4 GHz frekanslarında Phi derecelerine göre Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz Sonuçları	37
Tablo 3.1. Dielektrik yüzeyler ve karakteristikleri.....	41
Tablo 3.2. Mikroşerit antenin ölçüleri	45
Tablo 3.3. 3 farklı anten modelinin phi derecelerine göre RKA değerleri.....	66
Tablo 4.1. Savaş uçaklarının RKA değerleri.....	76
Tablo 4.2. Yedi adet mikroşerit antenin füzeyle uygulanmasıyla elde edilen radar kesit alanı	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Radar Kesit Alanının farklı objelerde yansıma modeli	8
Şekil 2.1 MALD Platformu	23
Şekil 2.2 MALD Platformunun Yan Açından Görünümü.....	25
Şekil 2.3 MALD Platformunun burun tarafından görünümü	26
Şekil 2.4 MALD Platformu 180 derecede ışıma analizi	27
Şekil 2.5 FE-BI Analiz Çözüm Yöntemi.....	28
Şekil 2.6 MALD PLatformu Mesh yapısı	28
Şekil 2.7 Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz sonucu(dB).....	29
Şekil 2.8 Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz sonucunun MALD platformu üzerinde gösterimi	29
Şekil 2.9 MALD Platformu Akı analizi sonucu	31
Şekil 2.10 MALD Platformu phi açısı 180-270 derece ve theta açısı 90 derece iken RKA ışınması	31
Şekil 2.11 1.5 GHz'de Monostatik Radar Kesit Alanı Sonucu.....	32
Şekil 2.12 2.75 GHz'de Monostatik Radar Kesit Alanı Sonucu.....	32
Şekil 2.13 2.75 GHz RKA sonucunun MALD platformuna uygulanması.....	33
Şekil 2.14 MALD platformu 360 derece RKA ışıması	34
Şekil 2.15 1 GHz için RKA analiz sonucu	34
Şekil 2.16 2 GHz için RKA analiz sonucu	35
Şekil 2.17 3 GHz için RKA analiz sonucu	35
Şekil 2.18 4 GHz için RKA analiz sonucu	36
Şekil 2.19 1,2,3 ve 4 GHz radar kesit alanı sonuçlarının tek bir grafikte çizdirimi	36
Şekil 2.20 MALD PLatformu Akı Analizi	38

Şekil 3.1 Mikroşerit Anten Boyutlarının Gösterimi	40
Şekil 3.2 Mikroşerit Antende besleme ağının gösterimi	41
Şekil 3.3 Mikroşerit Antenin Matlabda gösterimi	43
Şekil 3.4 Mikroşerit anten S(1,1) grafiği	44
Şekil 3.5 Mikroşerit anten resistans-reaktans grafiği	44
Şekil 3.6 Mikroşerit anten ANSYS HFSS gösterimi.....	45
Şekil 3.7 ANSYS HFSS programında oluşturulan silindir	49
Şekil 3.8 Silindir 1 GHz RKA analizi	49
Şekil 3.9 Silindir 2 GHz RKA analizi	50
Şekil 3.10 Silindir 3 GHz RKA analizi	50
Şekil 3.11 Silindir 4 GHz RKA analizi	51
Şekil 3.12 1,2,3 ve 4 GHz için silindir RKA sonuçlarının tek grafikte gösterimi.....	51
Şekil 3.13 Mikroşerit antenin silindire entegre edilmiş hali.....	52
Şekil 3.14 Mikroşerit antenin silindire entegre edilmiş hali yan perspektif.....	52
Şekil 3.15 Konformal mikroşerit anten	53
Şekil 3.16 Konformal mikroşerit anten yan perspektif.....	53
Şekil 3.17 Mikroşerit anten akı analizi	54
Şekil 3.18 1 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu.....	55
Şekil 3.19 2 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu.....	55
Şekil 3.20 3 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu.....	56
Şekil 3.21 4 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu.....	56
Şekil 3.22 1,2,3 ve 4GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu	57
Şekil 3.23 Baskı dipol antenin ANSYS HFSS programında görünümü	59
Şekil 3.24 Baskı dipol antenin 1,2,3 ve 4 GHz'de RKA sonucu	60
Şekil 3.25 Papyon anten yapısı.....	63

Şekil 3.26 Papyon antenin silindir üzerine uygulanmış hali	65
Şekil 3.27 Papyon antenin 1,2,3 ve 4 GHz'de RKA sonucu.....	65
Şekil 4.1 2 elemanlı dizi paterni	69
Şekil 4.2 Lineer Dizi Hüzmesi	69
Şekil 4.3 Array sayısına göre hüzme genişliği	70
Şekil 4.4 Tarama açısına karşı hüzme genişliği	71
Şekil 4.5 Eleman sayısına göre ilk yan lobların pozisyonu	72
Şekil 4.6 Faz açısının genliğe etkisi	73
Şekil 4.7 2 adet mikroşerit antenin MALD platformunda uygulanması	77
Şekil 4.8 2 adet mikroşerit antenin MALD platformunda RKA analizi.....	78
Şekil 4.9 7 adet mikroşerit antenin MALD platformunda uygulanması	79
Şekil 4.10 7 adet mikroşerit antenin MALD platformunda RKA analizi.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

RKA	Radar Kesit Alanı
RAM	Radar Emici Malzemeler
LO	Düşük Gözlemlenebilirlik Teknolojisi
FE-BI	Frekans Alan Hibrit Çözücü
MALD	Hava Konuşlu Minyatür Platformu
TALD	Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak Platformu
THz	Terahertz
GHz	Gigahertz
dB	Desibel
dBm	Desibel metre
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
IE	İntegral Denklemi
BW	Bant Genişliği
RF	Radyo Frekansı
FIT	Sonlu Entegrasyon Tekniği
HF	Yüksek Frekans
UHF	Ultra Yüksek Frekans
VHF	Çok Yüksek Frekans
TEM	Enine Elektromanyetik Alan
EM	Elektromanyetik
LoS	Görüş Alanı
λ	Dalga boyu
σ	Radar Kesit Alanı

1. GİRİŞ

Son 20 yılda hava savunmada başarı elde etmek, düşman kuvvetlerini yanıltmak ve tuzağa düşürmek için hava savunma sistemlerinde birçok gelişme meydana gelmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanı RF tuzaklarıdır.

RF tuzakları, hem aktif hem de yarı aktif havadan havaya ve karadan havaya füzeler dâhil olmak üzere birden fazla radar tabanlı tehdide karşı hava platformlarına koruma sağlamayı amaçlayan, harcanabilir, bağımsız, yerleşik bir elektronik karşı tedbir sistemidir. Havadaki RF tuzakları, şaf tuzaklarına ve düşmanı yanıltma kabiliyetine sahiptir ve herhangi bir platformdan güvenli bir şekilde fırlatılabilir. Ayrıca bir enerji kaynağını etkinleştirir, yolunu dengeler, aydınlatıcı sinyaller alır ve tehdit parametrelerini analiz eder. Daha sonra tuzak, gerçek bir yanlış hedef oluşturmak için alınan sinyalleri değiştirir ve radar tehdidine doğru aldatıcı bir sinyal iletir. Radar tehditleri tuzağa kilitlenir ve yolunu takip eder. Böylece tehdit rotası, korunan hava platformundan saptırılır ve saldıran füzenin metrelerce ıskalama mesafesini garanti eder.[1]

1970'lerde, Brunswick Corporation'ın savunma bölümü, bir dizi güçsüz radar tuzağı aracı geliştirmiştir. Bunlardan biri, 1980'lerin başında İsrail Hava Kuvvetleri için lisanslı olarak üretilen Samson'dur. İsrail Hava Kuvvetleri, Samson'u uzun bir süre kullanmıştır ve Amerika Kuvvetleri 1980 ile 1985 yılları arasında 2000'den fazla Samson satın almıştır. Samson satın alınmasının ardından 1985 yılından sonra, ABD Donanması TALD (Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak) adlı geliştirilmiş bir tuzak aracı için ilk siparişi almıştır ve bu platform, 1987 yılında Amerika Donanmasının hizmetine girmiştir.

Temel bir TALD, kare kesitli bir gövdeye, açılır kanatlara ve kuyruk yüzeyine sahip, elektriksiz bir süzülme aracıdır ve hız ve manevra kabiliyetleriyle birlikte programlanabilen bir dijital uçuş kontrol sistemine sahiptir. TALD platformu, yüksek bir irtifadan fırlatıldığında yaklaşık 126 km'ye kadar süzülme menziline sahipken, alçak irtifalarda 26 km'ye kadar süzülebilir. TALD platformunun farklı versiyonları bulunmaktadır ve bu versiyonlar farklı yüklere sahiptir. Bu versiyonlardan, A/B37U-1(V)1 platformu 36 kilograma kadar şaf taşıyan bir şaf dağıtma aracıyken, A/B37U-1(V)2 platformu ise pasif bir radar tuzağıdır. ADM-141A modeli ise hem pasif hem de aktif radar geliştiricileri kullanır.

TALD'ların çoğu İsrail askeri kuvvetleri tarafından lisansla üretilmiş ve 1993'te ABD Donanması için 4000'den fazla TALD yapılmıştır. Bu tuzak, 1991'de Çöl Fırtınası Operasyonu'nun açılış aşamalarında, Irak hava savunma sistemlerini şaşırtmak ve kandırmak için 100'den fazla kez fırlatılıp başarılı bir şekilde kullanılmıştır. 1990'ların başında Brunswick, bir Teledyne CAE Model 312 (J700-CA-400) turbo jet ile çalışan TALD'ı geliştirmeye başlamıştır. Kandırma sistemi, önemli ölçüde artırılmış menzile sahipken yüksekte 300 km'den ve alçak irtifada 185 km'den fazla ve yüksek hızlı düşük irtifada yaklaşma ve ardından keskin bir patlama gibi çok daha gerçekçi uçuş profilleri sunmaktadır.

İlk sözleşme, yirmi adet TALD'ın ADM-141C turbo jet konfigürasyonuna dönüştürülmesini gerektiriyordu ve dönüştürülen bu platformlardan ilki 1996'da uçmuştur. Tasarlanan bu "aktif" tuzaklar, hem tuzaktan hem de füzeden gelen sinyalleri, alınan frekans ne olursa olsun, çok geniş bir frekans aralığında algılamaktadır. [2]

TALD platformundan sonra daha gelişmiş bir versiyon olan hava konuşlu minyatür yanıltma platformları geliştirilmiştir. Hava konuşlu minyatür yanıltma platformu (MALD), 1995 yılında düşman hava savunmalarının bastırılması için küçük, düşük maliyetli bir tuzak platformu elde edebilmek adına geliştirilmiştir. Teledyne firması, 1996 yılında MALD platformunun bir versiyonu olan ADM-160A için bir geliştirme anlaşması yapmış ve bu platformun test uçuşunu 1999 yılında gerçekleştirmiştir. ADM-160A'nın başarısını değerlendirmek için nihai karar 2001 yılında alındı. ABD Hava Kuvvetleri 1000 adet ADM 160A almayı planladı, ancak 2001'de bir sistem geliştirme ve gösterim programı için bu sayı 150'ye düşürülmüştür.

Ocak 2002'de ABD Hava Kuvvetleri programı iptal etti çünkü insansız hava aracı hizmetin gereksinimlerini karşılamak veya diğer görevleri gerçekleştirmek için yeterli menzile ve dayanıklılığa sahip değildi.

MALD platformu çeşitlerinden ADM-160A, bir frekans aralığını kapsayan çeşitli aktif radar güçlendiricilerden oluşan bir radar imzası kopyalama sistemi taşır. Bu nedenle bu sistem, B-52 bombardıman uçağından F-117 savaş uçağına kadar herhangi bir uçağın radar imzasını taklit edebilir.

MALD platformu, daha kompakt taşınabilmek için katlanmış kanatlara sahiptir. Fırlatma sırasında kanatlar açılmaktadır ve bir TJ-50 turbo jet, füzeyi 100'e kadar farklı geçiş noktasından oluşan önceden belirlenmiş bir rotada itmektedir. GPS destekli bir ataletsel

navigasyon sistemi, MALD'ı rotasında tutmaktadır. Uçak yerden kalkmadan önce rota, kalkışa kadar herhangi bir noktada pilot tarafından değiştirilebilir.[3]

MALD platformunun bir sonraki versiyonu için, Raytheon firmasıyla 2003 yılında sözleşme imzalanmıştır. Raytheon, ADM-160B adlı bir model geliştirmiştir. Bu model, özellikleri açısından ADM-160A versiyonuna benzemektedir ancak gövde kesiti ve ağırlıkları farklıdır. ADM-160B modelinin ilk teslimatı ve serbest düşme testi 2009 yılında yapılmıştır. Kritik tasarım 2010 yılında incelenmiş ve bu yılda hava kuvvetlerine büyük bir oranda MALD teslimatı yapılmıştır. 2008 yılında, MALD platformunun karıştırıcı eklenmiş versiyonu olan MALD-J platformu için Raytheon ile bir sözleşme yapılmış ve ilk ürün 2012 yılında hava kuvvetlerine teslim edilmiştir. Bu yıl içerisinde, MQ-9 Reaper insansız hava aracına entegre edilmesi için MALD ve MALD-J platformlarının yer doğrulama testleri tamamlanmıştır. 24 Eylül'de Raytheon operasyonel testlere başlamış ve dört fırlatmadan dört başarılı uçuş gerçekleştirmiştir. 2015 yılında, MALD-J platformu 2 yıl içinde yapılan tüm uçuş testlerindeki gereklilikleri yerine getirerek operasyonel testleri başarıyla tamamlamıştır.

2016 yılında, Raytheon firması MALD-J platformuna elektronik harp yükü, alçak irtifada uçuş kabiliyeti ve gelişmiş veri bağlantısı ekleyerek MALD-X modelini geliştirmiştir. MALD ve diğer elektronik hava harp sistemleri gibi havadan fırlatılan tuzakların, gelecekteki çatışmalarda giderek daha önemli hale geleceği görünmektedir.

Gerçekleştirilecek olan hava saldırının başarılı olması için bu çalışmada Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma (MALD) platformları tercih edilmiştir. Bu platformlar savaş uçaklarının havadaki konumunu olduğundan farklı bir noktada göstererek operasyonun başarılı olmasını sağlamaktadırlar. Aynı zamanda yerleşik bir veri bağlantısı aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yeniden görevlendirilebilir ve düşman topraklarından alçak irtifa nüfuz etme yeteneğine sahiptirler, bu yetenek elektronik savaşları kullanmaya başlamadan önce hedef alana girmek için yardımcı olabilmektedir. Hedef alana girilmesinin ardından düşman güçlerinin havadaki savaş uçağının konumunu doğru yerde tespit edememesi için MALD platformu bu savaş uçağının radar imzasını kopyalamaktadır. MALD platformunun bu durumu gerçekleştirebilmesi için radar kesit alanının yüksek olması gerekmektedir. Radar kesit alanı (RKA), herhangi bir nesne tarafından yakalanan ve aynı dalga boyunda yeniden yayılan elektromanyetik enerjinin bir ölçüsüdür. Bir hedefin radar kesit alanı (RKA), bir radar tarafından görülen eşdeğer alandır.

Geçmiş çalışmalarda savaş uçaklarının radar kesit alanı analizleri farklı yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu radar kesitini küçültmek ve savaş uçaklarının görüş mesafesini düşürerek uçağın düşman tarafından tespit edilememesi için yapılmıştır.

Daha önceki çalışmalarda mikroşerit yapılı anten dizisi kullanılarak geniş bantta radar imzası azaltılmaya çalışılmıştır. Parazit elemanların kullanılması veya bazı direnç elemanlarının çıkarılmasının bir kazanç artışı belirlediği ancak ızgaralı lobların başlaması nedeniyle monostatik radar kesit alanında dalgalanmalara neden olduğu vurgulanmıştır [4]. Radar kesit alanını arttıran veya azaltan yöntemlerden biri de malzemenin şekli ve malzeme cinsidir. Savaş uçaklarında kullanılan malzeme ve uçağın kavisleri radar kesit alanının performansını etkiler [5]. Radar kesit alanını analiz etmek için kullanılan bir diğer yöntem ise fiziksel optik yöntemidir. Bu yöntemi kullanmak için füze gövdesini temsil eden silindir ve konik cisimler kullanılarak analizler yapılır. Bu yöntem hayalet uçaklarda kullanıldığında radar kesit alanında bir azalma tespit edilir ve hayalet uçağın tespit mesafesi azalır

Hedeflenen modelin ölçekli modeli ile de radar kesit analizleri yapılmaktadır. Ölçek küçüldüğü için frekans arttırılarak gerçeğe yakın analizler yapılabilmektedir. Dalga boylarını ve modelleri gerçek ölçekli platformlara ölçeklendirerek, standart MHz/GHz frekanslarında gerçek boyutlu uçakların RKA'sı ile ayrıntılı karşılaştırmalar yapılabilir. Çalışmalar ele alınırken radar kesit alanını küçültmeye yönelik analizler yapılmıştır. Ancak MALD platformunun düşman kuvvetlerine karşı yanıltıcı etkisinin artması için radar kesitinin yüksek olması gerekmektedir.

Radar kesit alanı, hava konuşlu minyatür yanıltma platformlarında düşman güçlerine yanıltıcı sinyal göndermek adına önemli bir durum haline gelmiştir. Harekât alanında görev yapan uçaklarda bulunan MALD platformlarının radar kesit alanının belirli bir yönde arttırılması radar güdümlü tehditlere karşı aktif bir koruma metodu olarak değerlendirilebilir. Bu yanıltma platformu, düşman radar ve hava savunma noktalarını aldatma, şaşırtma ve hatta geçici olarak kör etme yeteneğine sahiptir. MALD, hava savunma sistemlerine elektronik bastırma yöntemlerinin yanı sıra dost uçak profillerini ve radar işaretlerini aynen kopyalayarak yayınlamaktadır. Radar sistemlerinin en yaygın olduğu faaliyetler sivil ve askeri faaliyetlerdir. Sivil kullanımları arasında, hava trafiğinin kontrolü, uçuş yönetimi, deniz ve kara trafiğinin yönetimi, hava durumunu tahmin etmek, arama kurtarma çalışmaları, güvenlik ve aracın hız denetimi bulunmaktadır. Askeri kullanımları ise gözlem, hedef izi sürme, hedefi tanımlama, erken uyarı sistemleri, füze savunması, hava saldırılarının uyarısı,

güdümlü sistemleri, operasyonlar için konum belirleme, simülasyon ve modelleme gibi görevleri içermektedir. Radar kesit alanının seviyesi arttıkça MALD platformlarının düşman kuvvetlerine olan kandırıcı etkisi artmış olacaktır. Oluşan radar kesit alanının seviyesinin artırılması için faz dizi antenlerden oluşan bir yapı üzerine çalışma yapılacaktır. Faz dizi antenler, Elektronik Harp uygulamaları için giderek daha önemli hale gelmektedir. Radarlarda faz dizili antenler kullanılarak anında bir hedeften diğerine geçilebilir ve böylece birden fazla hedef etkin bir şekilde takip edilebilir. Faz dizisi antenler, her bir ışıyıcının farklı faz açılarıyla beslenebildiği bir anten grubudur. Bu sayede, elektronik olarak kontrol edilebilen bir anten ışıması oluşur. Bu yöntem, tüm anten ışımalarının elektronik olarak yönlendirilmesine olanak tanır ve mekanik yönlendirmeden daha esnek ve az bakım gerektirir. Faz dizi antenleri herhangi bir anten yapısı ile kullanılabilir ve her bir ışıyıcının faz kayma miktarı ayarlanarak ışıma demetinin ana yönü değiştirilebilir. Hem yatay hem de dikey ışıma demetleri elde etmek için bir anten düzleminde birçok ışıyıcı kullanılır. Faz kaymalı dizi antenlerde, anten elemanlarına uygun faz değerleri ile besleme sağlanarak antenin mekanik kısıtlamalardan bağımsız olarak yüksek hızda tarama yapabilmesi sağlanır.. MALD gövdesi üzerinde kullanılması planlanan faz dizi anten yapısının analizi ANSYS HFSS programı üzerinde yapılacaktır ve elde edilecek sonuçlar bu tez çalışmasının konusudur.

1.1. Radar Kesit Alanı

Radar kelimesi “radyo algılama ve menzil değiştirme” sözcük öbeğinin kısaltmasından meydana gelmektedir. Radar, 2. Dünya Savaşı sırasında icat edilmiştir ve 1940'larda piyasaya sürülmesinden bu yana yaygın bir sözcük haline gelmiştir. Radarın geliştirilmeye başlanmasındaki temel sebep, görsel hedef tespitinin yerine geçecek bir arayış olmasından kaynaklıdır. Radyo dalgaları atmosferdeki ışık dalgalarına göre daha az zayıflamaya maruz kalır ve radarlar ortam ışığının çok az olduğu veya hiç olmadığı geceleri de hedefin görünmesini sağlayabilir. Bu nedenle, aktif bir cihaz olarak kabul edilir. Radarın kullanım amaçları bir nesneye olan mesafenin bulunması, hedefin yönünün bulunması, hedefin hızının tespiti ve hedefin yansıma özelliklerinin belirlenmesi olarak sıralanabilir. Radarın çalışma prensibi, ses dalgasının yansımaya benzer özellikler gösterir. Yansıtıcı bir nesnenin bulunduğu yönde bağırsanız bir yankı açığa çıkar ve sesin havadaki hızı biliniyorsa nesnenin mesafesi ve yönü tahmin edilebilir. Yankının nesneden döndüğü süre, sesin hızı bilindiği zaman mesafeye dönüştürülebilir. Radar teknolojisi de elektromanyetik enerji darbelerini ses dalgaları ile benzer şekilde kullanır.

Nesneler, uçaklar, gemiler, kara taşıtları, binalar, arazi özellikleri radyo dalgalarını RKA'ları ile orantılı olarak yansıtır. Radyo dalgalarının uçaklar, binalar ve diğer nesneler tarafından gelen yansımaları, televizyon üstü anten ile alınan yayınlarda TV ekranlarında görülen çoklu yankılar ile kendini gösterir. Radyo dalgaları ve ışık frekansları elektromanyetik enerjinin akışı konusunda benzer özelliktedir. Aralarındaki fark, ışığın frekansı radyo dalgalarından daha fazladır. Bir nesneye çarpan enerji birçok yöne saçılır fakat sadece yayıldığı yönde geri saçılan kısmı algılanabilir.

Gemi ve kara radarlarında daha uzun dalga boyu ve düşük frekanslar kullanıldığı için atmosferde rahatça ilerleyebilir. Bu durum, hava platformlu radarlarda kullanılan kısa dalga boyu ve yüksek frekanslarda da geçerlidir. Yansıyan radyo dalgalarını algılayarak sadece gündüz açık havada değil, karanlık havalarda, sis ve bulutlar içinde de nesneleri tespit etmek mümkündür. En temel formunda bir radar beş elemandan oluşur bir RF vericisi Tx vericinin frekansına ayarlı bir RF alıcısı Rx iki anten ve bir gösterim ekranıdır. Pratik uygulamalarda mono statik radarların Tx ve Rx'i tek bir anteni paylaşımlı olarak kullanır. Tx'in sinyali alırken aktif olmasını önlemek için, radyo dalgaları darbeler halinde iletilir ve bu iletim sırasında Rx kapatılır. Darbelerin tekrarlanma periyodu, darbe tekrar periyodu olarak adlandırılırken, saniyedeki gönderimin tekrar miktarı ise, darbe tekrarlama frekansı olarak adlandırılır.

Radar, elektromanyetik dalganın yayılma hızını kullanarak hedefle arasındaki mesafeyi belirleyebilir. Işığın hızı saniyede 300.000 km/s'dir. İki yönlü yayılma (hedefe doğru ve tekrar geri) hesaba katıldığında, hedefe olan R mesafesi,

$$R = c\Delta t / 2 \quad (1)$$

Bu denklemde c ışık hızını, Δt bir enerji darbesinin iletimi ile radar yankısının alınması arasındaki zaman aralığını gösterir.[6]

RF enerjisi yönlendirilmiş olarak ortama iletilir ve yoluna çıkan bir yansıtıcı nesne tarafından yansıtılır. Buradaki önemli kısım, gelen enerjinin küçük bir bölümü yansıtılır ve radar alıcı antenine geri döner. Alıcı antene geri dönen enerji, nesne yansıması yani echo olarak adlandırılır. Radar aldığı echo'yu onu yansıtan nesnenin yönü ve mesafesini bulmak için kullanır.

Radarın tarama aralığı, radarın görevine ve yerleşimine göre değişiklik gösterir. Düşük frekanslı radarlar, uzak mesafelerde gözetleme ve tespit amacıyla kullanılan uzun

menzilli sistemlerdir. Kısa menzilli sistemler ise daha yüksek frekanslarda çalışır ve tipik olarak azimutta taranır. Tarama radarları genel olarak karadaki sistemlerde, gemilerde veya uçaklarda bulunur. [7]

Radarlar tarama ile farklı yönlerdeki hedefleri ayırt edebilirken kullanılan darbe tekrar periyodu ile hedeflerin farklı mesafelerden algılanabilmesini sağlar. Yön ayrımının kuvvetlendirilmesi için anten enerjisi dar bir hüzmeye yoğunlaştırılır. Bir hedefi bulabilmek için hedeflerin ortaya çıkmasının beklendiği bölge, hüzmeye tarafından sistematik olarak taranır. Hüzmeye'nin taradığı alan tarama paterni olarak isimlendirilir. Tarama yapılan bölge ise tarama hacmi olarak adlandırılır. Hüzmeye'nin belirlenen alanı taramak için harcadığı süreye, tarama zamanı denir. Radar literatüründe hedef terimi, tespit edilmek istenen hemen hemen her nesnenin ifade edilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nesneler, bir uçak filosu, bir gemi filosu, kara taşıtı veya bir grup taşıt, karada konuşlu yapılar, yeryüzünde spesifik bir nokta, yağmur (meteoroloji radarları), ve serbest elektronlardır. Genellikle radarlar tarafından kullanılan radyo dalgaları düz çizgiler halinde hareket eder yani bir radarın hedeften eko alması için hedefin görüş alanı (LoS) içinde olması gerekir. Hedeften gelen eko sinyallerinin gücü bir Rx'in girişinde olan radyasyon gürültüsünün çıkışında her zaman var olan elektriksel gürültü seviyesinin üzerinde ve yeryüzünden eşzamanlı olarak alınan parazit yankılar, sinyal gücü seviyesinin üzerinde algılanacak kadar güçlü olmadığı sürece, hedef tespit edilemeyecektir. Bazı durumlarda parazit yankılar, iç gürültüden önemli ölçüde daha güçlü olabilir. Yankı yapan sinyallerin tespit edildiği en güçlü aralığı bulmak için bazı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler, iletilen dalgaların gücü, gücün iletilme zamanının periyoda τ / T görev döngüsü oranı, antenin boyutu (etkin dipol ve direktivite), hedefin yansıtma özellikleri, her tarama periyodunda hedefin anten hüzmeye içinde kalma süresinin uzunluğu, hedefin görüntülendiği taramaların sayısı, RF dalgalarının dalga boyu, arka plan gürültüsünün veya parazit yankının gücüdür.

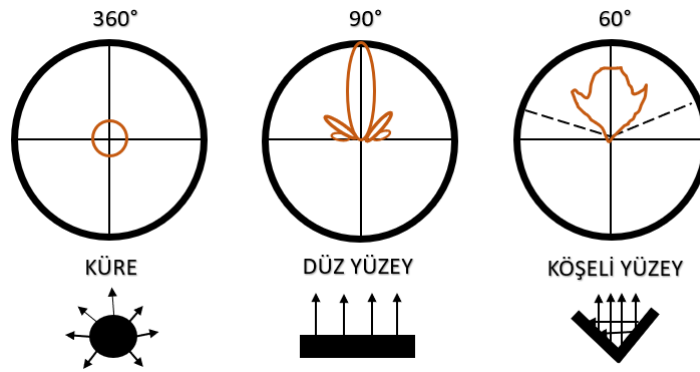
Radar kesit alanı uçağın geometrik şekline, büyüklüğüne ve kullanıldığı malzemenin yapısına göre değişiklik gösterebilir. [8]

Bir hedefin radar kesit alanını analiz etmek, hedefi tanımamıza ve hedef hakkında bilimsel olarak araştırma yapmamıza olanak sağlar. Günümüzdeki radarlar hedefin uzaklığı ve hızını tespit etmek için kullanılır fakat hedef boyutunu tespit etmek zordur. RKA, hedefin geometrik yapısıyla ilişkilidir ve hedeften geri yansıyan elektromanyetik dalga olarak tanımlanabilir. RKA (σ), geometrik kesit (S), yansıtma (R) ve yansıtma dalga yönünün (D)

bir kombinasyonu olarak ifade edilebilir. [9] Radar kesit alanı, bir hedefin radar sinyallerini alıcının bulunduğu yönde yansıtma yeteneğinin yani geri saçılma gücünün bir ölçüsüdür. [10]

Radar kesit alanı, hedeften yeniden yayılan gücü temsil etmek için iki yönlü radar denklemi kullanılır. Yansıtma, hedef tarafından yeniden yakalanan gücün oranı olarak tanımlanır. Yönlülük, radar yönünde geri saçılan gücün, saçılımın tüm yönlerde (izotropik olarak) aynı olması durumunda geri saçılacak olan güce oranını temsil eder. RKA geometrik alana eşit değildir. Bir kürenin radar kesit alanı, πr^2 olarak ifade edilir ve burada r kürenin yarıçapıdır. Şekil 1.1, yaygın şekillerdeki geri saçılımı göstermektedir. Bir küreye radar sinyali gönderildiğinde, sinyal her yöne eşit olarak yansır. Radarın görüş hattına dik olan düz bir plakaya radar sinyali gönderildiğinde, doğrudan gönderilen yere geri yansır. Eğik bir plakaya radar sinyali gönderildiğinde, radardan uzak bir noktaya yansır. Bir köşeye sinyal gönderilirse, düz plakada olduğu gibi doğrudan gönderilen yere geri yansır.

Şekil 1.1’de nesneler dikey eksenleri etrafında döndürülürken RKA desenleri gösterilmektedir. Şekildeki oklar radar sinyallerinin objelerin türüne göre yansımalarının yönünü göstermektedir.



Şekil 1.1 Radar Kesit Alanının farklı objelerde yansıtma modeli

Küre esasen tüm yönlerde aynıdır. Düz plaka, doğrudan radara doğru hizalanmadığı sürece neredeyse hiç bir RKA'ya sahip değildir. Köşe reflektörü, düz plakaya benzer bir radar kesit alanına sahiptir ve daha geniş bir açı üzerinde gerçekleşir. Gemi ve uçak gibi platformlar genellikle köşeli yüzeylere sahiptir. Bu köşeler yansıtıcı özelliğe sahip olduğu için reflektör olarak adlandırılabilir. Bir uçak hedefi çok karmaşıktır çünkü çok sayıda yansıtıcı unsur ve şekle sahip geometriler barındırmaktadır.

Radar kesit alanı, radar tarafından gözlemlenen geniş fiziksel alan ve dikey açının yansımalarıyla birlikte en yüksek değeri uçakların kanatlarından alır. Uçaklarda bulunan diğer bir yüksek RKA ise, motorlardan veya pervanelerden kaynaklanan yansımalar nedeniyle uçağın burun ve kuyruk kısmıdır. Çoğu kendini koruma karıştırıcıları, uçağın burnu ve kuyruğu hakkında ± 60 derecelik bir görüş alanını kaplar, dolayısıyla hüzmeye üzerindeki yüksek radar kesiti kapsama alanına sahip değildir. Bir uçağın yan tarafı ise teorik olarak tüm senaryoların ortalamasının %30'unda bir tehdide maruz kalır. Radar kesit alanı, uçaklar için büyük bir öneme sahiptir çünkü radar, onları keşfetmek ve takip etmek için kullanılan ana ekipmandır. [11]

Radar kesit alanı ölçümleri, beklenen performansı doğrulamak için gereklidir. Ayrıca soğurucu maddelerin veya yansıtıcı tasarımların değerlendirilmesi için de ölçümler büyük önem arz etmektedir.

Soğurucu malzemeler, koaksiyel ve dalga kılavuzu iletim hattı ile olmak üzere çeşitli şekillerde test edilebilir. Bu yöntem, laboratuvar tezgahında kurulabilen ekipmanın kullanımına uygun olması ve ölçülecek alanların tamamının iletim hattı içinde yer alması nedeniyle avantajlıdır. Yöntemde, dalga boyunun büyüklüğü yansımanın gücünü gösterirken, dalga boyunun kayması da faz açısını belirtir. Zaman alanında yansıma ölçümleri ve sinyal kaynaklarının taraması, işlemi daha hızlı ve kolay hale getirir.

Radar kesit alanı, mühendislik ve bilimsel çalışmalar için olduğu kadar çeşitli tasarım yaklaşımlarının performanslarını test etmek, hedef veya hedef koşulları koleksiyonuna bir veri tabanı oluşturmak için bir araçtır. Radar kesit alanı ölçümleri, uçuş senaryolarında savaş uçaklarının radar imzalarını taklit edebilmek için fayda sağlamaktadır.

Bazı ölçümler, bir radarın bir dış mekân hedefinde eğitilmesiyle yapılmış olmasına rağmen, ilk radar kesit ölçüm tesisleri iç mekândaki yankısız odalardır. İç mekân menzilleri, ölçülebilen hedeflerin boyutlarında sınırlamalara maruz kalırken, dış mekân menzillerinde olumsuz hava koşulları nedeniyle %35'e varan kesintiler yaşanmaktadır. İç mekân menzilleri, hedefin çeşitli değişkenlere maruz kalabileceği hava koşullarına ve diğer faktörlere karşı koruma sağlayacak şekilde tasarlanırken, dış mekân menzilleri çevresel ortamda gerçekleşir ve tam ölçekli hedefleri ölçülebilir. Hepsi olmasa da çoğu dış mekân menzili, aslında sistem hassasiyetini artıran yer düzlemi etkisinden yararlanır. İç mekân ve dış mekân menzillerinin ortak sorunu, görünmeyen bir hedefin maruz kalacağı radar sinyallerinin bilinmemesidir. Darbeli radar enstrümantasyonu dış mekân menzilleri için

kullanılırken, iç mekân menzilleri için frekansla modüle edilmiş sürekli radar sistemleri tercih edilir. Dış mekân radar sistemlerinde, hedefin kolaylıkla tespit edilebilmesi için darbe genişliği yeterince uzundur. Her iki durumda da, ölçülen veriler kullanılarak radar görüntüleri oluşturulabilir. Radar görüntüleri büyük bir tanısal değere sahiptir ve radar kesit alanı kontrolünde kullanım için bir araçtır. Bu çalışmada yankısız bir odanın içindeki koşul varsayıp, ona göre analizler yapılmıştır.

Yayılan sinyaller ve yakalanan yankı sinyalleri, zamana ve mesafeye göre değişir. Bu kaynak, ister aktif bir emitör isterse pasif bir yankı yapan nesne olsun, bir uyarı kaynağından uzaklaştıkça genlik olarak bozulurlar ve mesafe arttıkça zayıflarlar. Burada k dalga sayısını gösterir, formülü $2\pi/\lambda$ 'dır ve r katedilen mesafedir. Bu nedenle, ωt çarpımı gibi, kr çarpımı da bir açıdır. Sinyalin dalga boyu $\lambda = c/f$ 'dir, burada c , ışığın hızıdır. Sınırsız boş uzayda, ışığın hızı nanosaniyede yaklaşık 0.29979 metredir. Sinyalin yer ve zamansal değişiminin formülü;

$$A(r) \exp[j(\omega t - kr)] \quad (2)$$

$$A(r) \exp[-i(\omega t - kr)] \quad (3)$$

Burada $A(r)$, artan mesafe ile sinyal yoğunluğundaki azalmayı tanımlayan karmaşık bir fonksiyondur. Sinyalin yalnızca gerçek kısmı ölçülebildiğinden ve iki formülün de gerçek kısımları aynı olduğundan, ikisi de elektromanyetik alanın zaman ve uzaydaki değişimini gösterir. Formül 2 ve 3'te bulunan k , dalga sayısını gösterir. Dalga sayısı, mesafenin artmasıyla birlikte fazda meydana gelen değişimin hızını gösterir ve sinyalin yayıldığı ortamdaki elektromanyetik özelliklere bağlıdır. Çoğu zaman bu ortam, dünya atmosferindeki havadır ve özellikleri boş uzayinkine çok yakındır. Boş alan dalga sayısı,

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (4)$$

μ_0 ve ϵ_0 boş alanın geçirgenliğini ve geçirirliğini gösterir. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m ve $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m'dir. Boş alan değerini diğer k 'dan ayırt edebilmek için 0 alt simgesi k_0 olarak eklenmiştir. Dielektrik malzemeler ve radar emiciler gibi diğer ortamlardaki yayılma,

$$k = k_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (5)$$

Burada μ_r ve ϵ_r , ortamın göreceli geçirgenliği ve geçirirliğidir, genellikle r alt simgesi ile gösterilir. $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$, kırılma indisi olarak bilinir.

Bir cisim, radarın hüzmesine yerleştirildiğinde cisim enerjinin bir kısmını her yöne dağıtır. Bu dağılma, fizikte saçılma olarak adlandırılır ve saçılan alanın dağılımı, nesnenin boyutuna, şekline, gelen dalganın dalga biçimine ve varış yönüne bağlıdır. Saçılan enerjinin dağılımı, saçılma kesiti olarak tanımlanabilir ve kendisiyle birlikte parçalarına genellikle saçıcı denir.

Saçılan enerjinin uzamsal dağılımına, geliş alanı hariç olmak üzere, sonlu bir açının geliş yönü tarafından karşılandığı tüm saçılma yönleri anlamına gelen bistatik saçılma denir.

Bir radarın hüzmesinde bulunan hedefin yankı özelliklerini alan cinsinden tanımlamak gerekmektedir. Rastgele yönler için, bu alan bistatik saçılma kesiti olarak bilinir ve eğer gönderilen sinyal radara geri dönerse, geri saçılım kesiti veya radar kesit alanı olarak adlandırılır. Radar kesit alanının tanımı, biri hedefte diğeri radar alıcısında ölçülen iki güç yoğunluğunun karşılaştırılmasına dayanır. Gelen dalganın güç yoğunluğu,

$$W_i = \frac{E_i H_i}{2} = \frac{Z E_i^2}{2} \quad (6)$$

Burada E_i ve H_i , gelen elektrik ve manyetik alanların yoğunluğudur ve Z , boş uzayın empedansıdır. E ve H alanı metre başına volt ve metre başına amper cinsinden ölçülebilir. Güç yoğunluğu, güç akışının yönüne dik olan alana karşılık gelen metre kare başına watt olarak ölçülür. Bu durumda, bir saçıcının anten gibi davrandığı varsayılmaktadır. Saçıcının etkili "yakalama" alanı olan σ 'den güç çektiği kabul edilir.

$$P = \sigma W_i = \sigma \frac{Z E_i^2}{2} \quad (7)$$

Hedefin ele geçirilen gücü her yöne eşit olarak dağıttığı varsayılmaktadır. Hedef, saçılmanın gözleendiği R mesafesine göre küçükse, saçılan gücün yoğunluğu, formül 8'e göre R ile azalacaktır.

$$W_s = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{\sigma Z E_i^2}{8\pi R^2} \quad (8)$$

R 'nin hedeften uzakta ölçülmesine rağmen, belirli bir yön varsayılmadığına dikkat edilmelidir. Saçılan güç yoğunluğunu saçılan elektrik alan kuvveti cinsinden ifade edilebilir.

$$W_s = \frac{E_s H_s}{2} = \frac{Z E_s^2}{2} \quad (9)$$

Yakalanan alanı σ , önceki 2 formülün birleşimi şeklinde yazarsak,

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{S_r}{S_t} \quad (10)$$

Bu ifade gelen ve saçılan manyetik alan kuvvetlerine dayanır; bu durumda elektrik alanları, karşılık gelen manyetik alanlar ile basitçe değiştirilebilmektedir. S_r , saçılan güç yoğunluğunu, S_t ise hedef tarafından yakalanan güç yoğunluğunu gösterir. Yakalama alanı, hedefin veya saçıcının radar kesit alanıdır ve bize bu alanı ölçmenin bir yolunu sunar.

Güç dağılımı, mükemmel iletken bir optik küre olarak düşünülür. Bu durumda bir hedefin radar kesit alanı, hedefle aynı yönde aynı gücü saçacak olan bir metal kürenin yansıtılan alanıdır. Hemen hemen tüm saçıcıların radar kesiti, gelen dalganın varış açısına ve saçılma yönüne bağlıdır. Burada zorluk, radar kesit alanını tanımlarken hedefin enerjiyi her yöne eşit olarak dağıttığını varsayarak bilinen gerçeğe meydan okumuş olunmasıdır. Formülde r mesafesine bağlı kalınmıştır ve mükemmel saçıcı bir sistem olmayan bir ortam varsayarsak bu durum hesaplamalarda zorluk yaratmaktadır. Bu istenmeyen etkiyi ortadan kaldırmak için r sonsuza yaklaşım yapılarak formül yeniden düzenlenmiştir. Radar kesit alanının denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_r}{S_t} \quad (11)$$

Formül 8'e göre Monostatik radar-menzil eşitliğinin türetim safhaları özetlenirse,

Radardan R uzaklıktaki güç yoğunluğunu bulmak için,

$$P_D = \frac{P_{Tx}G}{4\pi R^2} \quad (12)$$

P_{Tx} iletilen tepe gücünü, G anten kazancını, R ise mesafeyi göstermektedir.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} (m^2) \quad (13)$$

P_r hedeften radar yönünde yansıyan gücü, σ radar kesit alanı,

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}G\sigma}{(4\pi R^2)^2} A_e \quad (14)$$

P_{Rx} alınan gücü, A_e ise anten açıklığını göstermektedir.

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}G^2c^2\sigma}{f^2(4\pi)^3 R^4} \quad (15)$$

f iletim frekansını, c ise ışık hızını göstermektedir. Logaritmik olarak formül,

$$10\log P_{Rx} = 10\log P_{Tx} + 20\log G + 10\log \sigma - 20\log f - 40\log R - 30\log (4\pi) + 20\log c \quad (16)$$

Tx ve Rx'te farklı anten kullanan mono-statik radarlar için çift yönlü radar eşitliği (veya radar menzil eşitliği) ise aşağıda verilmiştir. [12]

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left[\frac{\sigma c^2}{(4\pi)^3 f^2 R^4} \right] \quad (17)$$

Logaritmik olarak,

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + 10\log \sigma - 20\log f - 40\log R - 30\log (4\pi) + 20\log c \quad (18)$$

Radar kesit alanı, farklı uçakların tespit edilmesinde kullanılır. Bazı uçaklar düşük tespit edilebilirliğe sahip olacak şekilde tasarlanır ve bunlar düşük bir RKA'ya sahip olacak şekilde emici boya, düz yüzeyler, özel olarak açılı yüzeyler gibi tasarım özellikleri kullanırlar. Diğer yandan, yüksek RKA'ya sahip olan uçaklar ise, yuvarlak yüzeyler, motorlar, antenler vb. gibi birçok çıkıntıya sahip olacak şekilde tasarlanırlar ve bazı sinyalleri kaynağa geri yansıtma etkili bir şekilde garantilenir.

Bir cisimden gelen radar yankısını azaltmanın bir yolu, gelen elektromanyetik enerjiyi emmek, böylece hedefe geri yansıma için mevcut net enerjiyi azaltmaktır. Enerjiyi absorbe etmek için, bir dirençteki akımlar gibi indüklenen akımların gelen alanlarla aynı fazda olduğu malzemeler bulunmalıdır. Aslında birçok emici malzeme kayıp mekanizmasını sağlayan karbondan üretilir ve enerjinin dağılması elektromanyetik enerjinin ısıya dönüşmesiyle gerçekleşir fakat her enerji emilimi karbon gerektirmeyebilir.

Radar emici yapılar, geniş bir frekans bandında ve geniş bir olay açısı aralığında radar kesit alanını azaltmak için potansiyel adaylardır. Bu yüzden , uygun substrat madde seçilerek radar emilimi artırılıp azaltılabilir. Hem düzlemsel hem de uyumlu radar emici malzemenin monostatik RKA'sı, tam dalga simülasyon yazılımı kullanılarak tahmin edilebilir.[13]

Kırılma indisi manyetik geçirgenlik ve elektrik geçirgenliğinin ürününü içerdiğinden, elektrik kayıplarının yanı sıra manyetik kayıplar da meydana gelebilir. Bu

nedenle, kayıplı malzemeler karbona ek olarak veya karbonun yerine ferrit veya karbonil demir de içerebilir.

Radar kesit alanında değişiklik yapmak için kullanılan diğer yöntem ise şekillendirmedir. Radar kesit alanını tehdit eden faktörler belirlendikten sonra şekillendirme kısmı tasarım aşamasındaki bir sistem için pratiktir. Teknik ve maliyet faktörleri açısından var olan bir sisteme bunu uygulamak daha güçtür. Bununla birlikte, havadaki sistemlerin çoğu için, radar kesit alanı kontrolü, açılal konide yani burun kısmında, geniş yan kanatlardan daha önemlidir. Bu nedenle şekillendirme faktörü ile radar kesit alanı faktörünün önemi burun kısmından yan kanatlara dağıtılabilir. Şekillendirmenin en iyi yapıldığı kısım sistem tasarım aşamasıdır.

Bu tezde, radar kesit alanının azaltılmasının aksine arttırılması üzerine çalışılmıştır. Radar kesit alanının arttırılması, radar izi taklit edilecek savaş uçaklarının konumlarını belirsiz hale getirilip radar izinin kopyalandığı hava konuşlu yanıltma platformlarının konumunu düşmana gösterecektir. Düşman, tespit etmek istediğı savaş uçağı yerine radar kesit alanı arttırılmış hava konuşlu yanıltma platformunu tespit ederek yanlış noktayı hedef alacaktır ve savunma güçlerinin operasyonu başarıyla yönetmelerini sağlayacaktır.

1.2. Literatürdeki Çalışmalar

Füze, savaş uçağı, insansız hava araçları vb. platformlarının üzerinde radar kesit alanı analizleri gerçekleştirmek için literatürde birçok metot ve analiz yer almaktadır.

Radar Kesit Alanı (RKA), bir hedefin yansıtma gücünün hesaplanmasıdır. Askeri uçakların RKA'sının azaltılması, bu uçakların geç tespit edilmesini sağlar ve güvenlik unsurlarından yararlanmasına izin verir. Bir askeri aracın RKA'sı güvenlik, çaba ve hayatta kalma için son derece önemli bir tasarım ögesi haline gelmiştir. Bu nedenle, doğru RKA tahmini ve azaltma, bu tür araçlar için son derece önemlidir. Hedefin şekli, yönelimi, çalışma frekansı, görünüş açısı, ortamın geçirgenliği ve darbenin iletilen gücü gibi çok sayıda faktör radar kesit alanını etkiler.

Radar ve görünmezlik teknolojisinin hızlı gelişimi, radar kesit alanı ölçümlerine olan ilgiyi arttırmıştır. Radar kesiti, genellikle askeri ve savunma sektöründe uygulanabilirliği yüksek olan çeşitli uçak ve füzeleri tespit etmek için kullanılır. Görünmez bir uçak, yüksek bir RKA değerine sahip ticari bir uçağın aksine, özellikle düşük bir RKA'ya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Hayalet uçakların radar kesit alanı, hedefin malzemesine, mutlak boyutuna, gelen dalganın gelen ve yansıyan açısına, verici ve alıcı antenlerin

polarizasyonuna göre değiştirilebilir. Bu parametreler uçakların görünürlüğü açısından önem arz etmektedir.

Uçakların görünürlük seviyesini azaltan teknolojilerin geliştirilmesi, silah platformlarının üretkenliğini düşürmeye devam etmektedir. Bu nedenle, tespit edilebilirliği en aza indirerek görünürlüğü azaltmak çok önemli bir konu haline gelmiştir. Radar imzasıyla ilgili olarak, dört temel RKA minimizasyon tekniği vardır: biçimlendirme, radar emici malzeme, pasif iptal ve aktif iptal. Tasarım aşamasında olan cihazlar için yalnızca şekillendirme mümkündür, bu nedenle geliştirme aşamasında olan araçlar için bu yöntem kullanılabilir fakat dördünden en verimli olanı radar emici malzemelerdir. Radar emici malzemeler, şekillendirmenin tek başına etkili olmadığı durumlarda kullanılabilir.[14]

Rao ve arkadaşları, silindir, kesik koni ve dairesel düz levha gibi mükemmel iletken nesnelerin boyut, frekans ve görünüş açısı gibi parametrelere göre radar kesit alanının tahmin edildiği bir analiz gerçekleştirmiştir. Radar kesit alanını tam olarak tahmin etmek zor olduğu için, alternatif olarak birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin çoğu, fiziksel optik methoduyla ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada verilen analizi optik bölgedeki uzak alan monostatik radar kesit alanı ölçümlerine dayanmaktadır. Hesaplamalar, basit modellerin radar kesit alanını belirlemek için Fiziksel Optik (PO) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, füze ve roketleri temsil eden konik ve silindirik modellerin radar kesit alanı Matlab simülasyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Matlab simülasyonu kullanılarak, füzeyi oluşturan nesneler için en boy açısına karşı dBsm'de dar bantta RKA için dikdörtgen grafikler elde edilmiştir. Analizde uzak alan monostatik radar kesit alanı elde edilmiştir ve basit bir modelleme olması için 10 GHz frekansta MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar analizle tutarlı olarak bulunmuştur ancak analiz için oluşturulan geometride objeler köşesiz düz bir şekilde simüle edildiği için ve füzenin mesh yapısı zayıf kaldığı için gerçek füze yapısına uygun bir sonuç çıkma ihtimali düşmektedir.[15]

Radar kesitini tanımlamak için öncelikle verici ve alıcı antenimiz ve birinci antenden gelen dalgayı alıcıya yansıtan bir hedef nesnemiz veya yüzeyimiz olduğu varsayılır. RKA, temel olarak, mükemmel yansıtıcı bir kürenin geometrik olarak yansıtılan alanını soyut olarak ifade eder. Radar kesit alanını analiz etmek için obje silindir, dikdörtgen ve kesik koni şeklinde gruplandırılabilir. Dikdörtgen bir yüzey için fiziksel optik yöntemiyle RKA hesaplama formülü,

$$\sigma_v = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1v} - \sigma_{2v} \left[\frac{1}{\cos \theta} + \frac{\sigma_{2v}}{4} (\sigma_{3v} + \sigma_{4v}) \right] \sigma_{5v}^{-1} \right|^2 \quad (19)$$

$$\sigma_H = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1H} - \sigma_{2H} \left[\frac{1}{\cos \theta} + \frac{\sigma_{2H}}{4} (\sigma_{3H} + \sigma_{4H}) \right] \sigma_{5H}^{-1} \right|^2 \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left(\frac{\sin(ak \sin \theta \cos \emptyset)}{ak \sin \theta \cos \emptyset} \frac{\sin(bk \sin \theta \cos \emptyset)}{bk \sin \theta \cos \emptyset} \right)^2 (\cos \emptyset)^2 \quad (21)$$

Geometrik kırınıma dayalı dikdörtgen düz plakaların radar kesitleri için ifadeler formülde gösterilmiştir. Burada Formül 19’da σ_v dikey radar kesit alanını, Formül 20’de σ_H yatay radar kesit alanını, a dikdörtgenin genişliğini, b dikdörtgenin yüksekliğini gösterir.

Silindir bir yüzeyin RKA hesabı,

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{2\pi H^2}{\lambda} \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{\lambda r \sin \theta}{8\pi (\cos \theta)^2} \quad (23)$$

Bu formülde r, silindirin yarıçapını, H silindirin yüksekliğini, θ açısı ise silindirin y-z ekseninde yaptığı açıyı göstermektedir.

Kesik bir koni için RKA hesabı,

$$\sigma_{\theta_n} = \frac{8\pi(z_2^{1.5} - z_1^{1.5})^2}{9\lambda \sin \theta_n} \frac{\sin \alpha}{(\cos \alpha)^4} \quad (24)$$

şeklinde yapılarak füze gövdesinin simülasyonu yapılabilir. Bir koni, r_1 ve r_2 yarıçaplarına bölünerek 2 ayrı konik yapı şeklinde bulunabilir. z_1 , koninin r_1 yarıçaplı üst bölgesindeki koninin yüksekliğini göstermektedir.

Radar kesit alanı, bir nesnenin gelen bir dalgayı yansıtma kapasitesinin bir ölçüsü olarak ifade edilebilir. Frekans ve zaman alanı analizi, bir hedefin radar kesit alanını incelemek ve ölçmek için etkili araçlardır. Geometrik olarak karmaşık bir nesnenin RKA'sını analiz etmek için, önce RKA davranışını ve çok daha basit geometrik bileşenlerinin özelliklerini kavramak gerekir. RKA nesnenin şekline, frekansına ve varış açısına göre değişmektedir. Gelen dalga, düz bir yüzeyle karşılaştığında tamamen yansıtacağı için yüksek bir RKA değeri açığa çıkar. Radar soğurucu malzemeler kullanılmadan bunu azaltmak için kavisli yüzeyler kullanılabilir veya varış açısı değiştirilebilir.[16]

Vladimir ve arkadaşları, füze ve uçaklarda bulunan burun bölgesinin üzerinde radar kesit alanı analizleri yapılmıştır. RKA için simülasyonlar, farklı en, boy açıları ve frekanslar için gerçekleştirilir. RKA analizi için sık kullanılan yöntemler geometrisel optik, fiziksel optik ve momentler metodudur. Simülasyonlar fiziksel optik yöntemi kullanılarak POFACETS GUI aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Radarın radomu veya bir uçağın gövdesi tipik olarak oval bir şekle sahiptir. Radom, kapalı antenin elektriksel performansı üzerinde önemsiz bir etkiye sahipken, yer tabanlı ve havadaki uygulamalarda anteni olumsuz ortamlardan korur. Radom, arayüzlerdeki dalga yansımaları ve kırılmaları ve radom materyallerindeki kayıplar nedeniyle antenin elektriksel performansını etkiler. Benzer şekilde, uçağın gövde bölümü, bir ojiv yapı olarak tahmin edilebilir. Ojiv yapı, iki boyutlu ya da üç boyutlu bir cismin yuvarlak şekilli konik ucudur. Ayrıca, genel olarak kullanılan boyutlar varsayımsal füzenin boyutlarına uygundur. Bu araştırma, tipik olarak füze, uçak gövdesi veya dikkatlice modifiye edilmiş bir radar radomunda kullanılan keskin bir yapının, elektronik bir karşı önlem sistemi için ideal bir yapı olabileceği sonucuna varmaktadır. Pürüzsüz kıvrımlı bir ojiv yüzeyi, geniş bir en boy açısı aralığında çok düşük radar kesiti ile sonuçlanacağından hedefin tespit edilebilirliğini azaltabilir ve bu nedenle kara radarlarının böyle bir hedefi tespit etmesi zor olacaktır. Çalışmadaki simülasyonların sonucu hedefin neredeyse görünmez hale geldiğini göstermektedir.[17]

Elektromanyetik dalgalarla ışımlandığında hedef tarafından yansıtılan sinyal, radar kesit alanının algılanması ve lokalize edilmesi için geri verilir. Bazı uçaklarda, radar kesit alanı ölçümleri oldukça karışık ve maliyetli olabilmektedir çünkü ölçümler için alan, ekipman ve uçuş testleri yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, çoğu durumda, RKA'nın değerlendirilmesi, yankısız bir odada ölçekli bir model uçak kullanılarak yapılabilir. Krzysztof ve arkadaşları, 1:7 ölçekli bir model IAR 99 uçağını AutoCAD programında tasarlamış ve test etmek için MATLAB programına aktarmıştır. RKA, karmaşık uçak modelini üçgen ve dikdörtgen yüzeyler gibi çok daha küçük basit şekillere ayrıştırarak, frekansa veya geliş açısına göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın ardından uçağın minyatürü yankısız odaya koyularak analizleri yapılmıştır. Deneysel ölçümler sırasında kullanıla araçlar Fourier Dönüşümü ve Ters Fourier Dönüşümüdür. Yankısız odada elde edilen sonuçlar, MATLAB analizi yoluyla elde edilen sonuçlarla eşleşmiş ve doğrulanmıştır. Bu sonuçlar RKA'nın frekansla doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir.[18]

Radar kesit alanı analizi için kullanılan bir diğer yöntem ise fresnel bölgesi radar kesit analizidir. Fresnel bölgesi radar kesit analizi, uzak alan koşullarının yerine

getirilmesinin zor olduğu durumlarda güvenilir bir çözüm haline gelir. Mihai ve arkadaşları, bu ölçümler gerçekleştirebilmek için 0.8-2.7 GHz aralığında 2 adet dikdörtgen vivaldi anten yapısı kullanmıştır. Ölçüm düzeneği, empedans uyumsuzlukları, karşılıklı bağlantı ve çevresel çok yollu etkiler dikkate alındığında, Fresnel bölgesindeki nihai RKA formülü şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma_{Fresnel} = \frac{(4\pi)^3 (S_{21}^{total} - S_{21}^{coupling})^2}{G^2 \lambda^2 |1 - S_{22}|^2} x \sqrt{\frac{R_0}{R_\alpha(1 - |S_{11}|^2) S^2}} \left\{ \sqrt{\frac{d}{k_0}} x \frac{1}{(2h_1)^2} \left| f\left(-\frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{k_0}{d}}\right) - f\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{k_0}{d}}\right) \right| x \frac{2d}{k_0} \left| \int_{-b/2}^{b/2} \left[f\left(-h_1 \sqrt{\frac{k_0}{d}} - z' \sqrt{\frac{k_0}{d}}\right) - f\left(h_1 \sqrt{\frac{k_0}{d}} - z' \sqrt{\frac{k_0}{d}}\right) \right]^2 dz' \right| \right\}^2 \quad (25)$$

Bu yöntem, gerçek ortamda yapılan ölçümler ve simülasyonlarla doğrulanmıştır. 2 dB'den daha az hatayı, yöntemi ve hedef yüzeyi üzerindeki alan entegrasyonunu doğrular ve anten açıklıkları üzerindeki ortalama, RKA değerlendirmesi için klasik yöntemlere göre farklı bir alternatif sunmaktadır fakat bu yöntem uçağın veya füzenin yeryüzünde yarattığı saçılmalar için yapılmaktadır.[19]

Füze ve uçak platformlarının uçuş yolu, farklı bir radar kesit alanı metoduyla hesaplanıp yönlendirilebilir. Teorik olarak radar menzili hesaplanıp, savaş uçakları için istatistiksel bir değişken olan belirli bir tespit olasılığına giden bir yörünge önerilebilir. Bu çalışmada, A-4 uçağı üzerinde varsayımsal bir monostatik radarın elektromanyetik dalgasının geliş açısına göre RKA'sının değiştiği kanıtlanmıştır. 500 ft, 5.000 ft ve 12.000 ft'de dinamik RKA, bir yörünge'nin bir fonksiyonu olarak hesaplanmış ve belirli bir algılama fonksiyonunda radar menzili belirlenmiştir. Modelleme ve simülasyona dayalı bu çalışma, taktiklere bağlı olarak düşman tespit menzili azaltmada iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.[20]

Literatürdeki çalışmaların çoğunluğu, uçakların havadaki görünürlüğünü azaltmak amacıyla radar kesit alanını düşürmek için yapılmıştır. Çalışmalarda şekillendirme ve radar soğurucu malzemeler kullanılarak radar kesit alanını azaltmak amaçlanmıştır. Bu tezde, radar izini taklit edecek bir hava konuşlu yanıltma platformu üzerine çalışılmıştır ve bu platformlar, havada olan savaş uçağının radar izini taklit edeceği için radar kesit alanının artırılması gerekmektedir dolayısıyla radar kesit alanını arttırmaya yönelik metotlar üzerine çalışılmıştır.

2. HAVA KONUŞLU YANILTMA PLATFORMLARI

Savaş uçaklarının operasyonda başarılı olması için, uçağın RF füze sistemlerine karşı savunulması gerekmektedir. Yıllar boyunca, savaş uçaklarından yansıtılan RF enerjisini işleyerek saldırı açılarını belirleyen bu sistemler, gerekli açıyı algılama kabiliyetini sağlamanın yanı sıra, hava savunma elektronik karşı önlem için dokunulmazlığı kanıtlanmış çok etkili füze sistemlerine dönüşmüştür. Düşman uçağı hedeften uzaklaştırmak için kullanılan tuzaklar, aldatıcı tuzaklar olarak adlandırılır. Aldatıcı tuzaklar, aktif ve pasif olmak üzere 2'ye ayrılırlar. Aktif tuzaklar, askeri uçaklar ve kıtalararası balistik füzeler için bir savunma yöntemi olarak kullanılır. Pasif tuzaklar ise, görsel zekayı aldatmak için kullanılır. Tezin bu bölümünde, hava konuşlu yaniltma platformu çeşitlerinden çekilen aldatma platformu, taktik havadan fırlatılan tuzak platformu ve hava konuşlu minyatür yaniltma platformları anlatılmıştır.

2.1. Çekilen Aldatma (Towed) Platformu

Çekilen aldatma platformu, radar güdümlü füzelerden korunmak için bir uçağın arkasından çekilen bir cihazdır. Tuzak, uçağın radar imzasını taklit edecek şekilde tasarlanmıştır, böylece füzeyi uçaktan uzağa ve tuzağa doğru çeker. Bu, uçağın füzeden kaçmasını ve görevine devam etmesini sağlar.

Çekilen tuzak, tipik olarak bir kabloya bağlanan ve uçağın arkasına çekilen küçük, hafif bir cihazdan oluşur. Tuzak, uçağın radar imzasını taklit eden sinyaller yayarak, sanki füze uçak yerine tuzağa geliyormuş gibi görünmesini sağlar. Bu, füzenin güdüm sistemini karıştırabilir ve hedefini ıskalamasına neden olur.

Çekilen tuzaklar, özellikle havadan havaya muharebe veya kara saldırı görevleri için tasarlanmış askeri uçaklarda yaygın olarak kullanılır. Radar güdümlü füzelere karşı kapsamlı bir savunma sağlamak için genellikle işaret fişekleri gibi diğer karşı önlemlerle birlikte kullanılırlar. Çekici yem platformu, uçağın arkasından kablo ile bırakılan ısı yayan bir platformdur. Kanatta veya uçağın içinde muhafaza edilir. Isıya duyarlı füzeler uçak yerine bu çekici yemi hedef alırlar. Temel olarak çekilen tuzak platformu, uçakla birlikte çekilecek şekildedir ve bu tuzak, uçağın elektronik savaş takımlarının bir parçasıdır. Bu yaniltıcı teknoloji, savaş uçağına yönelen tehditleri gerçek hedefin kendisi olduğu geniş bir frekans bandında sinyaller yaymak üzerine kuruludur. Aldatmanın verimliliği, çekilen tuzaktaki sinyalin (J) büyüklüğüne, uçaktan yansıtılan radar sinyallerine ve uçakla çekilen yem arasında bulunan geometriye bağlıdır. J/S oranına dikkat edilmelidir bu oran olumsuz

etkilere sebebiyet verebilir. Çekilen aldatma platformlarının amacı, uçaktan uzakta RF enerji kaynağı yaratıp düşmanı yanıltmaktır. Bu tür cihazlar sürüklenmeyi aza indirmek için küçük boyutlarda tasarlanmıştır.

Çekilen tuzaklar, mutlaka birbirinden izole edilmesi gereken alıcı ve verici antenlere sahip olmaları için, alıcı antenleri genellikle verici antenlerinden dik yönlere yönlendirilir.

Tipik olarak, alıcı antenleri yemin kenarlarına monte edilirken, verici antenleri yemin ön ve arka kısmına yönlendirilir. Bu durum, gerekli izolasyonu sağlar ve performansı maksimum iletim kazancı ile maksimum alma kazancı arasındaki en iyi uzlaşmanın bulunduğu 45 derecede optimize eder. AN/ALE-50, askeri uçağa yönelen füzeleri elektronik karşı tedbir metotlarını kullanarak aldatan bir yanıltıcı platformdur. Sistem, ABD Hava Kuvvetleri ve Raytheon tarafından geliştirilmiştir ve bağlı olduğu uçaktan daha büyük radar kesit alanı yayarak uçağa yönelen füzeyi kendisine çekmektedir. Kosova, Afganistan ve Irak'ta icra edilen harekâtlarda ALE-50, radar güdüm füzelerine karşı uçakları korumuştur.

AN/ALE-50 adlı elektronik karşı tedbir aracı, ABD Hava Kuvvetleri, Deniz Kuvvetleri ve Deniz Piyadeleri uçakları ile birlikte bazı yabancı hava kuvvetleri tarafından kullanılan bir anti-füze karşı önlem tuzak sistemidir. Bu sistem, birden fazla ABD askeri uçağını karadan havaya ve havadan havaya radar güdümlü füzelerden korumak için tasarlanmıştır. Raytheon firması tarafından California, Goleta'daki tesislerinde üretilmektedir. ALE-50, genellikle bir kanat direğine monte edilen bir fırlatıcı ve fırlatma denetleyicisinden ve bir veya daha fazla harcanabilir yedekte çekilen tuzaklardan oluşur. Sistemin ana amacı, tuzakları uçağın arkasına çekerek RF güdümlü füzelerden koruma sağlamaktır. ALE-50, hem uçuş testlerinde hem de gerçek savaşta karadan havaya ve havadan havaya füzelerin saldırısına başarıyla karşı koymuştur.

AN/ALE-55, RF füze tehditlerine karşı son derece etkili olan, son derece gelişmiş bir RF kendini koruma bozucudur. Bu sistem, jet avcı uçaklarından bombardıman uçaklarına kadar her türlü sabit kanatlı hava aracını korumak için tasarlanmıştır. Diğer elektronik karşı tedbir sistemlerinden farklı olarak, AN/ALE-55 fiber optik çekili tuzak, uçaktan yüksek güçlü bir yanıtla sinyalleri karıştırarak çalışır. Bu nedenle, sistem oldukça gelişmiş bir RF koruma sağlayabilir ve etkinliği kanıtlanmıştır. Füzeler, uçaktan çekilen tuzağa güvenli bir şekilde yönlendirilir ve sürekli dalga tehditlerine karşı etkili olan geleneksel tekrarlayıcılardan farklı olarak, fiber optik çekili tuzak, darbeleri bastırmak ve saptırmak için

çeşitli karşı önlem teknikleri kullanarak uçağın yerleşik elektronik harp sistemi ile uyum içinde çalışmaktadır.[21]

Bu platform iple salınır ve serbest düşüş yerine savaş uçağına bağılı kalmaya devam ettiğı için analizi gerçekleştirmesi zor bir platformdur dolayısıyla analiz için bu platformun gerçeğı yakın bir sonuç vermeyeceğı düşünölüp, seçilmemiştir.

2.2. Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak (TALD) Platformu

Düşman hava savunma sistemlerinin tuzağı bir tehdit olarak algılamasına neden olmak için insanlı saldırı uçaklarını yakından taklit edebilen havadan fırlatılan bir tuzağı ihtiyaç vardır. Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak (TALD), havadan fırlatılarak hedef bölgeye önceden programlanmış bir uçuş rotası takip ederek düşman hava savunma sistemlerini şaşırtmak amacıyla kullanılan bir tuzaktır. Bu sayede, gerçek uçakların rotalarının ve hareketlerinin belirsizliğı ile karıştırılarak düşmanın radar algılama ve takip yeteneğı azaltılmış olur.[22]

TALD, "Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak" anlamına gelir. Askeri uçaklar tarafından düşman hava savunmasını aldatmak ve dikkatini dağıtmak için kullanılan bir tür elektronik karşı önlemdir.

TALD, avcı veya bombardıman uçağı gibi daha büyük bir uçaktan fırlatılan küçük, insansız bir hava aracıdır. Düşman radar ve hava savunma sistemlerini şaşırtmak ve dikkatini dağıtmak için onu fırlatan uçağın radar imzasını ve uçuş özelliklerini simüle etmek için tasarlanmıştır. TALD, düşman radarını daha fazla bozmak için karıştırma cihazları ve şaf dağıtıcılar gibi bir dizi elektronik karşı önlemle donatılmıştır.

TALD fırlatıldıktan sonra önceden programlanmış bir rotada uçarak düşman radarını ve füzelerini onu fırlatan uçaktan uzaklaştırır. TALD, göreve ve tehdit ortamına bağılı olarak farklı irtifalarda ve hızlarda uçacak şekilde yapılandırılabilir. Ayrıca, düşük radar imzası ve gelişmiş elektronik karşı önlemlerin bir kombinasyonu kullanılarak tespit edilmesi ve izlenmesi zor olacak şekilde tasarlanmıştır.

Taktik Havadan Fırlatılan Tuzak platformu, düşman hava savunma sistemlerine karşı saldırı operasyonlarında kullanılan ağır süzölme, güçlendirilmiş pasif ve aktif tuzaklardan oluşan bir ailedir. Bu tuzaklar, yüzey tabanlı ve hava savunmalarını seyrelterek ve karıştırarak etkinliğini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. TALD, aerodinamik bir araç olan ve önceden programlanmış bir süzölme aracı olarak kullanılan bir havadan fırlatılan araçtır.

F/A-18, F-14, EA-6B ve P-3 gibi uçaklar TALD fırlatma platformları olarak kullanılabilir.[23]

TALD, saldırı uçağı operasyonları sırasında düşman hava savunmasını aldatmak ve kandırmak için kullanılan, havadan fırlatılan, önceden programlanmış, güçsüz, planörlü, RF pasif veya RF aktif bir platformdur. Üç operasyonel TALD konfigürasyonu, A/B37U-1 (V1) aracı, A/B37U-1 (V2) radar pasif aracı ve ADM-141A radar aktif aracını içerir. Üretim farklılıkları, farklı üreticiler tarafından üretilen bileşenlerin kullanılması, malzeme seçimleri, boyut farklılıkları veya özelliklerde küçük değişiklikler gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir. Ancak bu farklılıklar, genel olarak tuzakların temel işlevi ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

TALD'ın gelişmiş versiyonları açığa çıkmıştır. Gelişmiş versiyonlar, saldırı uçağı operasyonları sırasında hava savunmasını aldatmak ve kandırmak için kullanılan, havadan fırlatılan, önceden programlanmış, güçlü bir RF aktif aracıdır. TALD platformunun farklı versiyonları ADM-141A, ADM-141B ve ADM-141C'dir. ADM-141A, pasif ve aktif olmak üzere 2 adet güçlendiriciye sahiptir. Bir süre kullanılmış ve daha sonra hizmetten çekilmiştir. ADM-141B, 36 kg şaf yükü taşır. ADM-141C versiyonuna turbo jet ve navigasyon yeteneği eklenmiştir. Ayrıca, gelişmiş bir arazi izleme kabiliyetine ve genişletilmiş görevler için bir uçuş zarfına sahiptir. ADM-141C ve ADM-141A aynı pasif ve aktif radar güçlendiricilere sahiptir.[24] Gelişmiş TALD platformu, hava savunmalarını yanlış yönlendirerek, taarruz uçaklarını koruyarak, anti radyasyon füze saldırısı için düşman radarlarını devreye sokarak, hava savunma mühimmat varlıklarını tüketerek ve elektronik istihbarat gözetlemesine yardım ederek, hava üstünlüğü misyonunu geliştirip taarruz uçaklarının beka kabiliyetini artırmak için kullanılmaktadır. Tüm RF pasif ve aktif versiyonları yaklaşık 180 kg ağırlığındadır. Her araçtaki bilgisayar, uçuş profillerinden alınan verilere göre önceden programlanır ve kalkıştan sonra bir dizi planlı manevra ile aracın uçuş yönetimi ve kontrolleri sağlanır. TALD platformu, bir savaş uçağının ısı ve radar imzalarını taklit edebilir.

TALD, Amerika Birleşik Devletleri ordusu ve diğer ülkelerin silahlı kuvvetleri tarafından kullanılmaktadır ve Körfez Savaşı, Kosova Savaşı ve Irak Savaşı dâhil olmak üzere bir dizi çatışma ve operasyonda kullanılmıştır. TALD platformundan sonra daha gelişmiş bir platform olan MALD platformu üretilmiştir.

2.3. Hava Konuşlu Minyatür Yanıltma (MALD) Platformu

Hava konuşlu minyatür yanıltma platformları (MALD), savaş ve bombardıman uçaklarının düşman operatörlerine görünen radar imzasını taklit eden küçük, düşük maliyetli ve insansız hava aracıdır. MALD platformlarının karıştırıcı versiyonuna MALD-J ismi verilir. MALD-J, istasyonda oyalanma yeteneğine sahip, elektronik saldırı için havaya yakın bir jammerdir. MALD-J, havadaki bir saldırı kuvvetinin, dost uçak veya mühimmatın tespitini bozmak veya reddetmek için belirli düşman radarlarını ve hava savunma sistemlerini bozarak görevini yerine getirmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. MALD-J, MALD platformunun tüm yeteneklerine sahip olmakla birlikte belirli erken uyarı radarlarını bozmaktadır. Ayrıca, bir düşmanın entegre edilmiş hava savunma sistemini harekete geçirmesi ve bozması planlanmıştır.

Savunma güçleri, düşmanın radar operatörlerini ve hava savunma sistemlerini aldatarak, dikkatini dağıtarak veya kandırarak havadaki saldırı kuvvetlerinin savaş alanına erişimini kolaylaştırmak için MALD ile donatılmış birimler kullanmaktadır. Bu birimler hava harekâtlarının başarılı bir şekilde sonuçlanmasına izin verecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.1 MALD Platformu

MALD platformu, Raytheon Füze Sistemleri tarafından tasarlanmış ve şu anda ABD Hava Kuvvetleri tarafından kullanılmaktadır. MALD hava aracı, muharebe harekâtlarında hava araçlarına ve savunma sistemlerine karşı üstün koruma sağlamaktadır. Turbo jetle çalışan MALD platformu, savaş uçaklarından bir aldatıcı yem olarak fırlatılır. Hava savunma

sistemlerini devre dışı bırakmak için ve düşmana karşı hava operasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılır. Havadan fırlatılan insansız aracın uzunluğu yaklaşık 3,04 m ve ağırlığı 300 lb'den az ve MALD aracının menzili yaklaşık 500 nmi'dir. Esnek ve döner kanatlı araç, savaş alanındaki ABD ve müttefik uçakların tüm savaş uçuş profillerini ve radar imzalarını doğru bir şekilde çoğaltarak düşman radarlarını ve entegre hava savunma sistemlerini bozar.[25]

MALD-J versiyonu, MALD yanıltma platformunun radar karıştırma yeteneği eklenmiş halidir ve görev gereksinimlerine göre hem tuzak hem de radar bozucu konfigürasyonlarında çalışabilir. İnsansız MALD-J karıştırıcı, havacıların ve uçakların düşman yolundan uzak durmasına yardımcı olmak için geleneksel elektronik savaş sistemlerine kıyasla düşman radarlarına daha yakın seyredebilir ve çalışabilir.

Düşman hava savunmalarına karşı koymak için gereken silah sayısını azaltmak amacıyla donanma, silahlı füzelerle birlikte ateşlenebilen yeni bir uçak bozucu sistem geliştirmeye başlamıştır. Minyatür Havadan Fırlatılan Tuzak sistem (MALD-N), düşman ateşini gerçek silahlardan uzaklaştırmanın yanı sıra, düşman savunmasını daha fazla bastırmak için karıştırma teknolojisiyle de donatılmıştır. Sorunlardan biri, hedeflerin çok karmaşık savunma sistemleriyle çok yoğun bir şekilde savunulması ve operatörlerin tek atışta bir öldürme zihniyetinde olmadıklarından, düşman savunmasını doyumak için birden fazla silahı menzil aşağı koymak zorunda olmalarıdır. MALD-N platformu bu soruna yardımcı olmuştur.[26]

MALD platformu, zaman içinde boyut ve yetenek olarak geliştirilerek farklı versiyonlara dönüştürülmüştür. MALD, yaklaşık 500 mil menzile ve bir saatlik uçuş süresine sahiptir. Bu platform, belirli bir alanda dolaşmak, belirli bir hedefi uzun süre karıştırmak üzere programlanabilir. Gelişmiş MALD platformu, aynı zamanda yerleşik bir veri bağlantısı aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yeniden görevlendirilebilecek ve düşman topraklarından alçak irtifa nüfuz etme yeteneğine sahip olup, elektronik savaşlar başlamadan önce hedef alana başarılı bir şekilde girmelerine yardımcı olmaktadır. Ayrıca iletişim düğümlerine saldırarak siber saldırılar da yapabilmektedir. Veri bağlantısı burada gerçekten önemli bir faktördür. MALD, önceden planlanmış bir rotada uçan platformdan, anında değişen elektronik savaş düzenine uyum sağlayabilen dinamik bir platformdur. Bu, 4. nesil avcı uçaklarının orta ve yüksek riskli muharebe ortamlarında hayatta kalmasına ve düşmanın hava savunma ağını ortadan kaldırmaya veya imha edilmesine yardımcı olmaktadır.

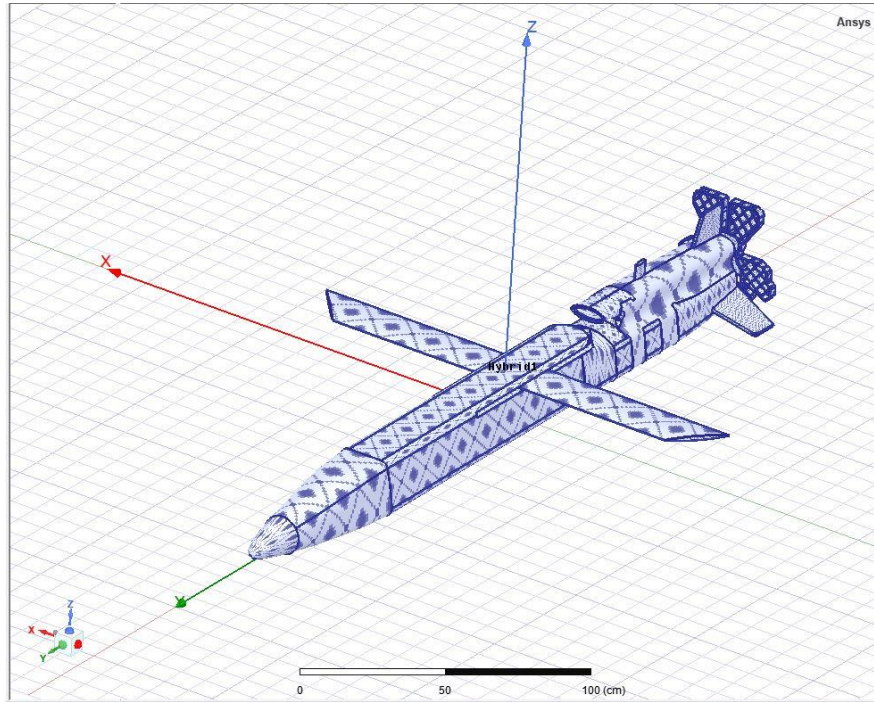
Hepsinden önce, uçaklara minimum destekle düşman topraklarına saldırdıklarında kritik bir koruma katmanı sağlamaktadır.

Yüksek frekanslı atış kontrol radarlarından algılanabilirliği azaltmak için optimize edilmiş savaş uçakları bulunmaktadır. Bu uçaklar, düşük frekansta radar frekansı üretebilirler. Ancak ürettikleri frekansla hedef tespit edebilmeleri, hava savunma sistemlerinin onları başarılı bir şekilde devreye sokabilmesi için hedeflenen kalitede iz üretebilecekleri anlamına gelmemektedir. Gelecekte, gelişmiş bilgisayar işleme ve otomasyonun yardımıyla hayalet bir uçağın ve özellikle dar bir bant genişliği kümesinden kurtulmak için radar izi oluşturulabilir.

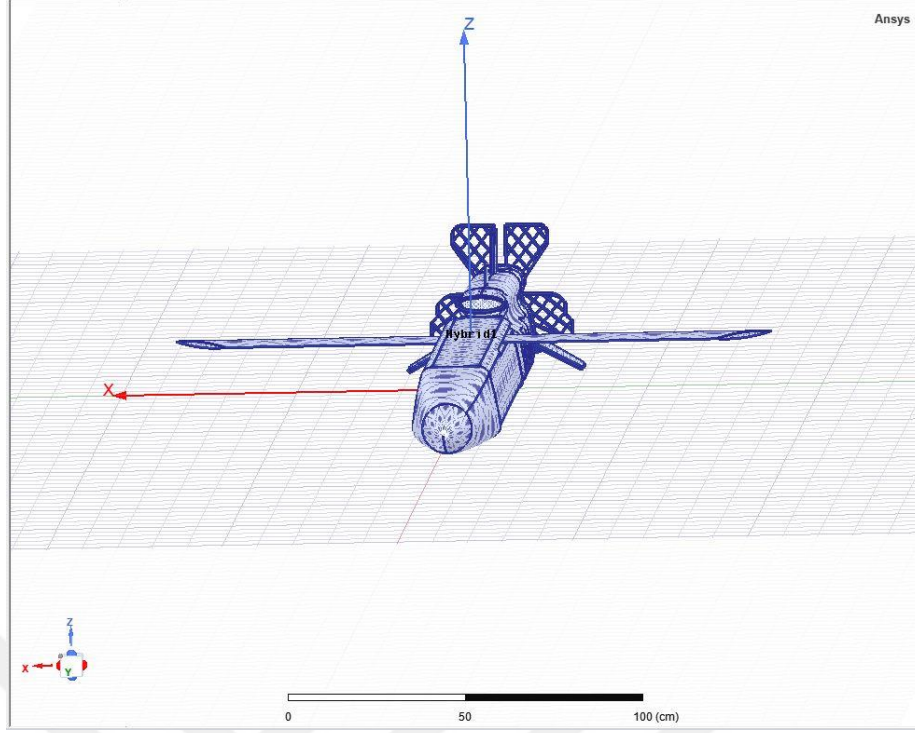
Bu çalışmada, hava sahasındaki en gelişmiş yanıltma platformu olduğu için MALD tercih edilmiştir ve MALD platformu üzerinde analizler yapılmıştır.

2.3.1. MALD Platform Analizi

Bu çalışmada, anten ile radar kesit alanı analizleri yapılmadan önce MALD platformunun step modeli oluşturulup, ANSYS HFSS programına aktarılmıştır. Uçak gövdesi, kanatları ve kuyruk bölümlerinin materyalleri alüminyum olarak seçilmiştir. ANSYS HFSS programı üzerinde MALD platformunun yan açıdan ve burun tarafından görüntüsü Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2 MALD Platformunun Yan Açıdan Görünümü



Şekil 2.3 MALD Platformunun burun tarafından görünümü

MALD Platformunun uzunluğu 2.38 m (7 ft 9.8 in), çapı 15.2 cm (6 in) ve kanat genişliği 0.65 m'dir. Analizler 1-4 GHz arasında gerçekleşmiştir. 2 GHz için dalga boyu hesabı,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^9} = 0.15 \text{ m} \quad (26)$$

Düz yüzeyler için radar kesit alanı ana lobların hesaplama formülü,

$$\sigma_1 = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} [m^2] \quad (27)$$

m^2 den dB'ye çevirmek için kullanacağımız formül,

$$\text{dB} = 10 \log \frac{\sigma_1}{I_0} = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (28)$$

Ana lobun genişliğini hesaplamak için,

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 \quad (29)$$

$ka \sin \theta = \pi$ için,

$$\theta = \arcsin (\pi / ka) \quad (30)$$

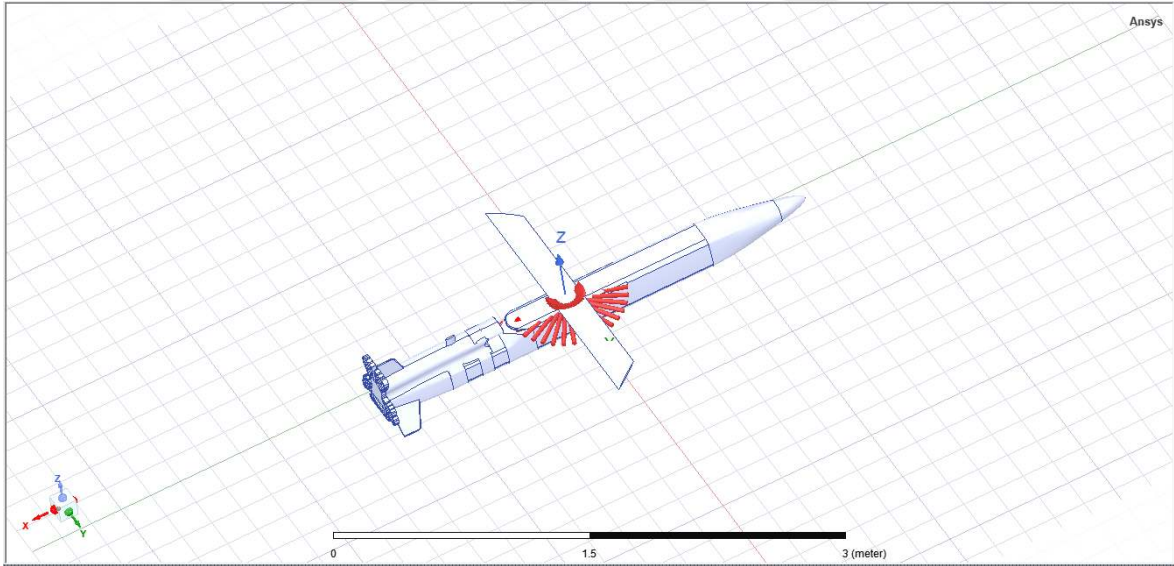
Sancak kanadının ön kenarı için radar kesiti ve ana lob hesaplama formülü,

$$\sigma_1 = \frac{9}{4} \pi A^2 \quad (31)$$

Gövde ve kanadının arka kenarı için radar kesiti ve ana lob hesaplama formülleri,

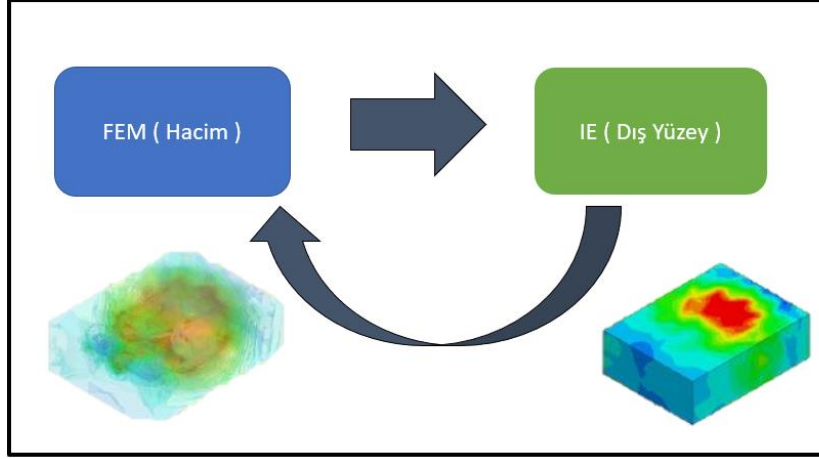
$$\sigma = \pi \rho_1 \rho_2 [m^2] \quad (32)$$

İlk olarak, farklı phi ve theta açıları kullanılarak MALD platformunun radar kesit alanı analiz edilmiştir. İlk analizde füzenin uç kısmı Şekil 2.4’ deki gibi orijine yerleştirilmiştir. Gelen dalga kaynağının phi açısının başlangıç değeri 0 derece, sonlanma değeri 180 derece ve aralığı 10 derecedir, theta açısının başlangıç değeri 90 derece, sonlanma değeri 90 derece ve aralığı 0 derece olarak belirlenmiştir. E0 vektörü Phi için 1 V/m, Theta için 0 V/m olarak belirlenmiştir. E0 vektörü bir birim vektöre normalize edilecektir. Düzlem dalgası çeşidi olarak düzenli yayılma seçilmiştir ve vektör giriş formatı küresel olarak uygulanmıştır.



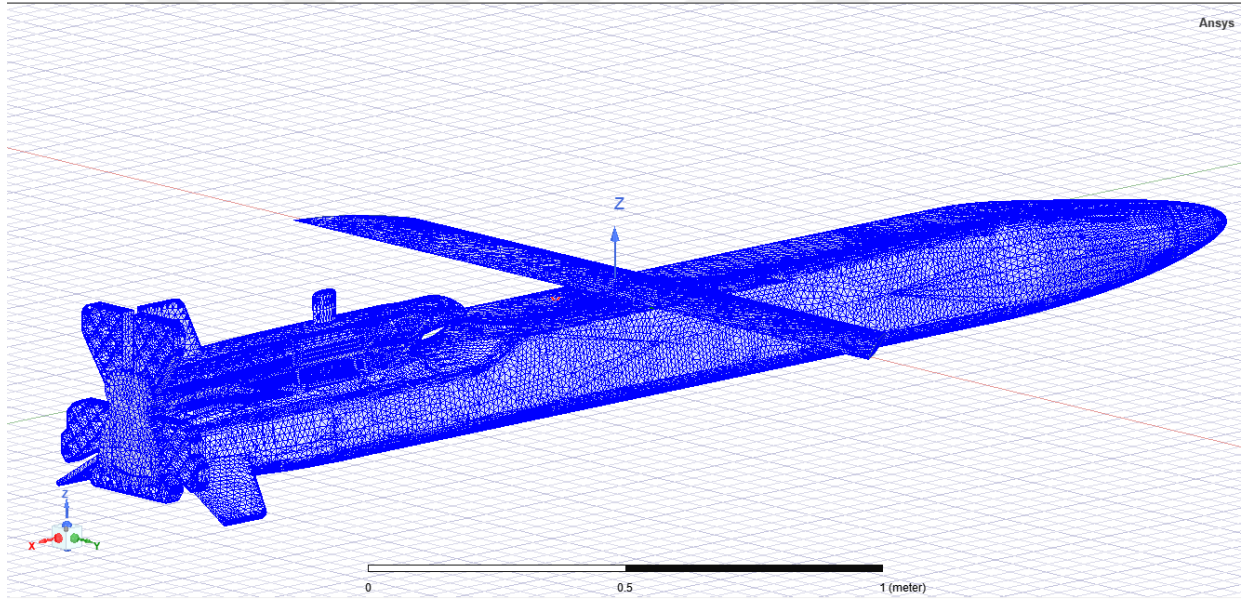
Şekil 2.4 MALD Platformu 180 derecede ışıma analizi

Analiz lineer olarak 1 GHz ve 4 GHz aralığında 1 GHz’lik adımlar halinde gerçekleştirilmiştir. Analiz çözücü olarak Frekans Alan Sınır İntegrali kullanılmıştır (FE-BI). FE-BI, çözüm hacmini minimuma indirmek için uyumluluğa, ışıma ve saçılma sorunları için yüksek doğruluğa sahip bir çözüm yöntemidir. Bu yöntem, Şekil 2.5’ deki gibi dış yüzeylere çözüm sunan İntegral eşitliği (IE) ve hacim içine çözüm sunan Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)’in birleşiminden oluşmaktadır.



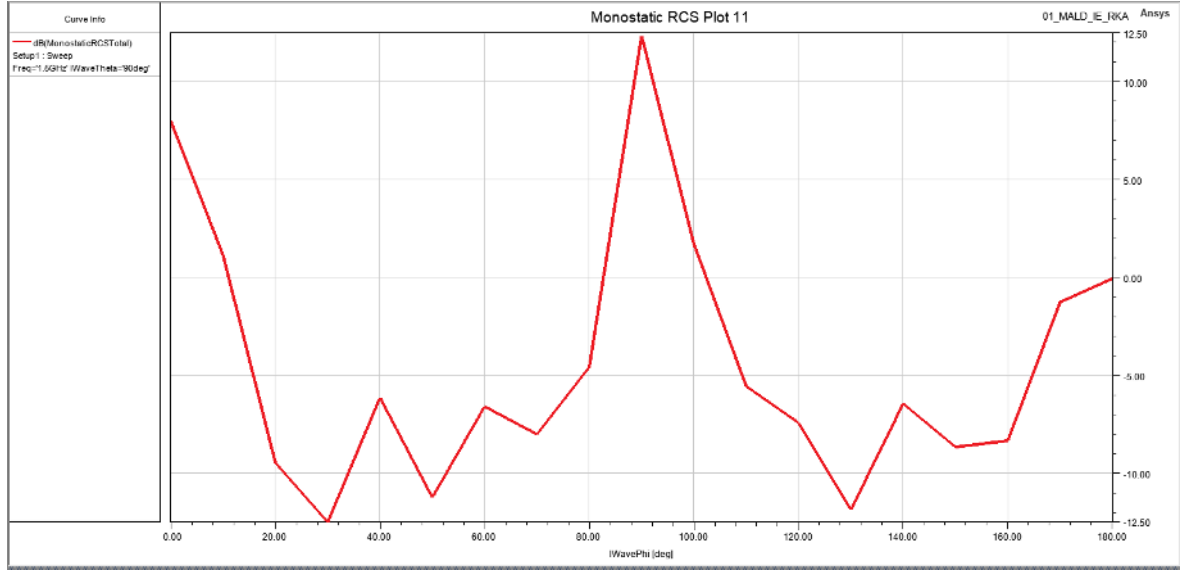
Şekil 2.5 FE-BI Analiz Çözüm Yöntemi

Analiz sonucu ortaya çıkan mesh yapısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

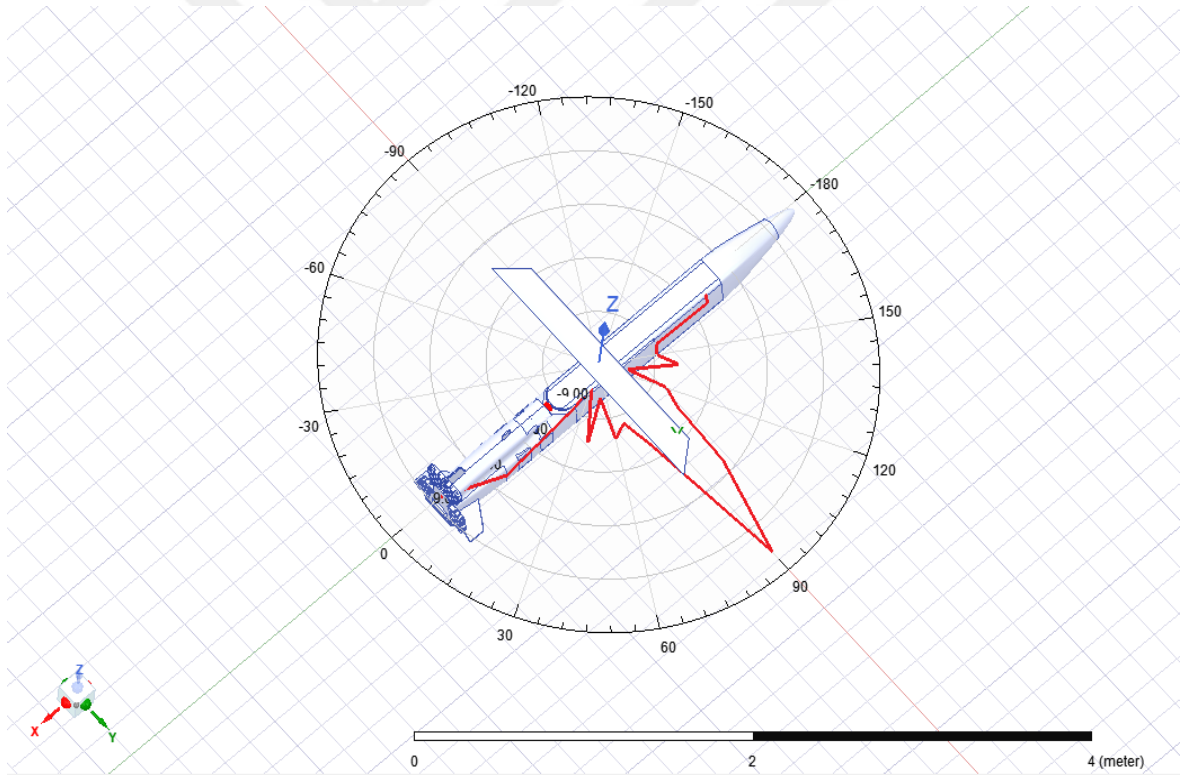


Şekil 2.6 MALD PPlatformu Mesh yapısı

Gönderilen düzlemsel dalgaya göre analiz sonucu oluşan monostatik radar kesit alanı grafiğinin kendisi Şekil 2.7’de, uçak modeli üzerindeki gösterimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre platform üzerinde radar kesit alanının en yüksek olduğu bölge, platformun kanat kısmıdır.



Şekil 2.7 Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz sonucu(dB)



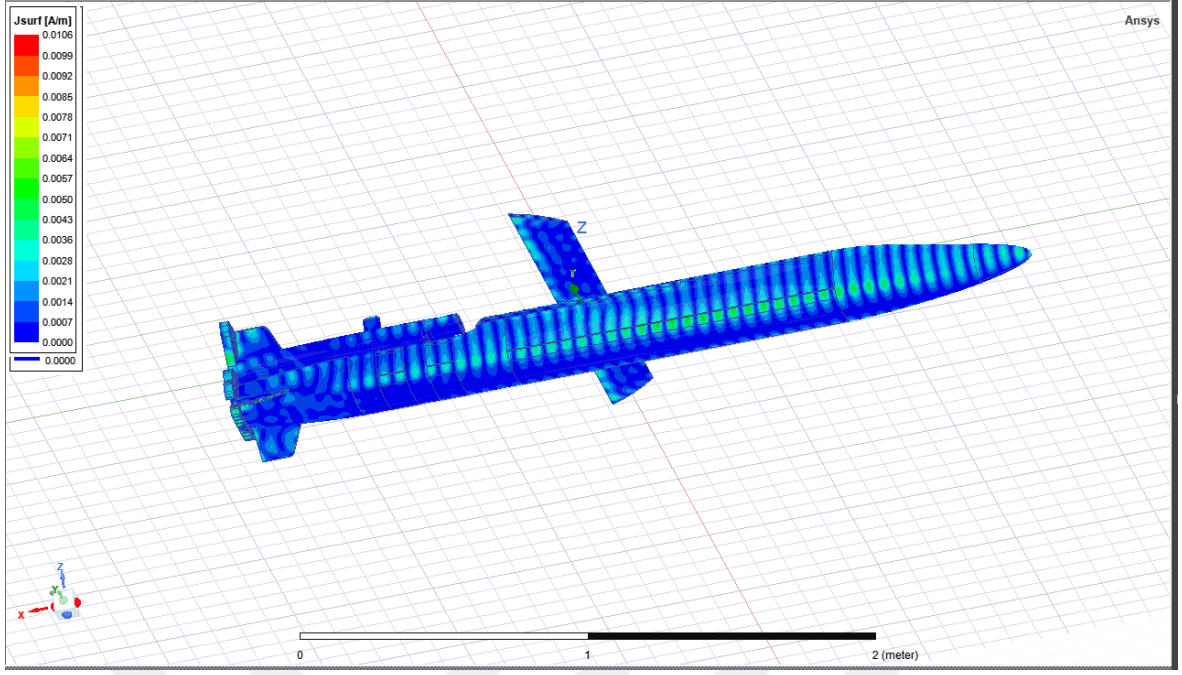
Şekil 2.8 Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz sonucunun MALD platformu üzerinde gösterimi

Gönderilen phi açılarına göre radar kesit alanının dB cinsinden sonuçları aşağıdaki Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 1.5 GHz'de phi açlarına göre monostatik radar kesit alanının dBm cinsinden sonucu

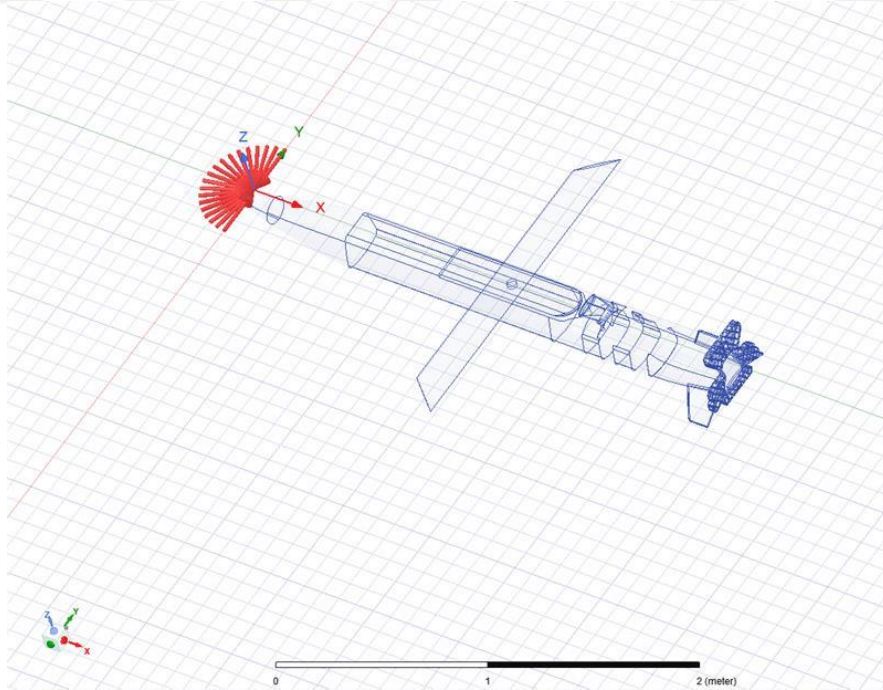
Phi Degree	Monostatik RKA (Frekans: 1.5 GHz) <i>dBm</i>
0	38.01
10	31.145
20	21.45
30	18.49
40	24.132
50	19.23
60	24.58
70	22.0
80	26.56
90	42.35
100	31.72
110	25.55
120	23.41
130	19.86
140	24.43
150	22.65
160	22.32
170	29.24
180	30.04

Akı alanının analiz sonucu aşağıdaki Şekil 2.9'da gösterildiği gibi oluşmuştur.



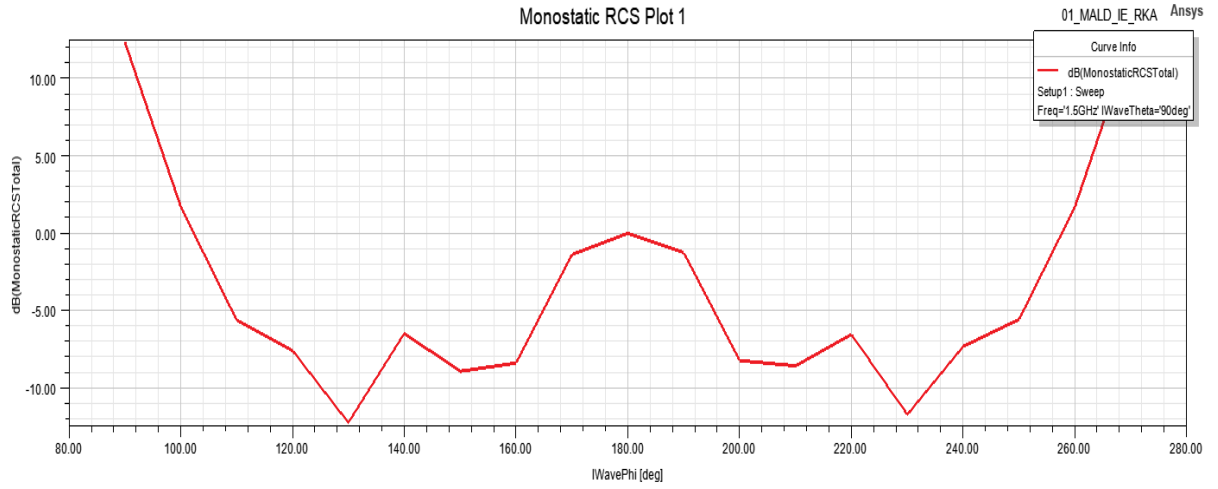
Şekil 2.9 MALD Platformu Akı analizi sonucu

Yine aynı tarama aralıklarında phi açısının aralığı 180-270 derece yapıлып, theta açısı 90 derece bırakılıp uçağın burun kısmından radar kesit alanının sonuçları gözlemlenmiştir.



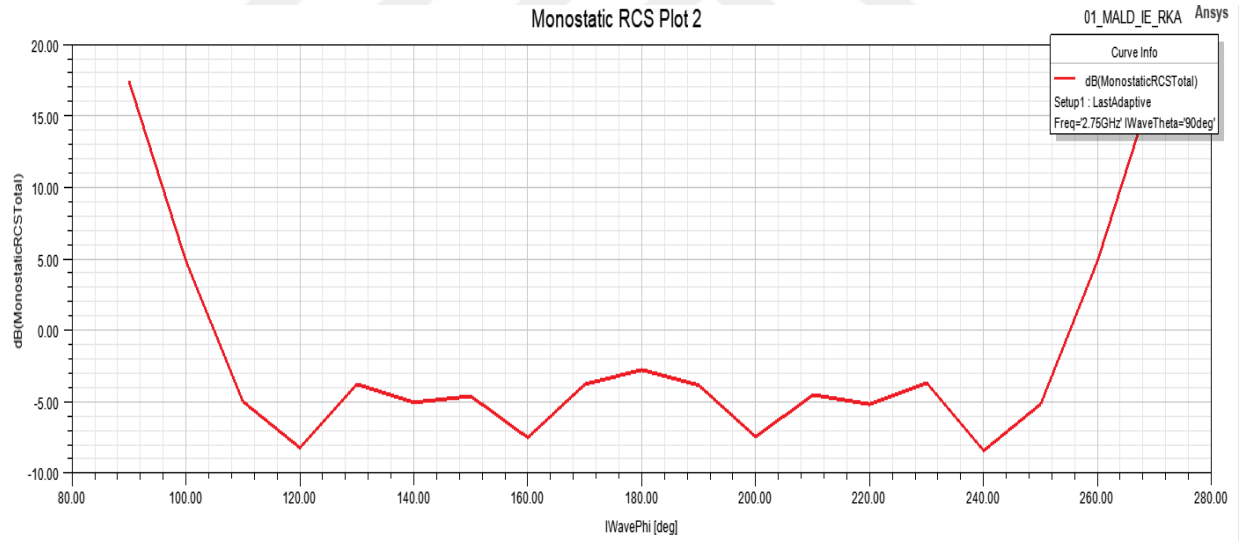
Şekil 2.10 MALD Platformu phi açısı 180-270 derece ve theta açısı 90 derece iken RCA ışınması

1.5 GHz için monostatik radar kesit alanı grafiği Şekil 2.11’ de gösterilmiştir.



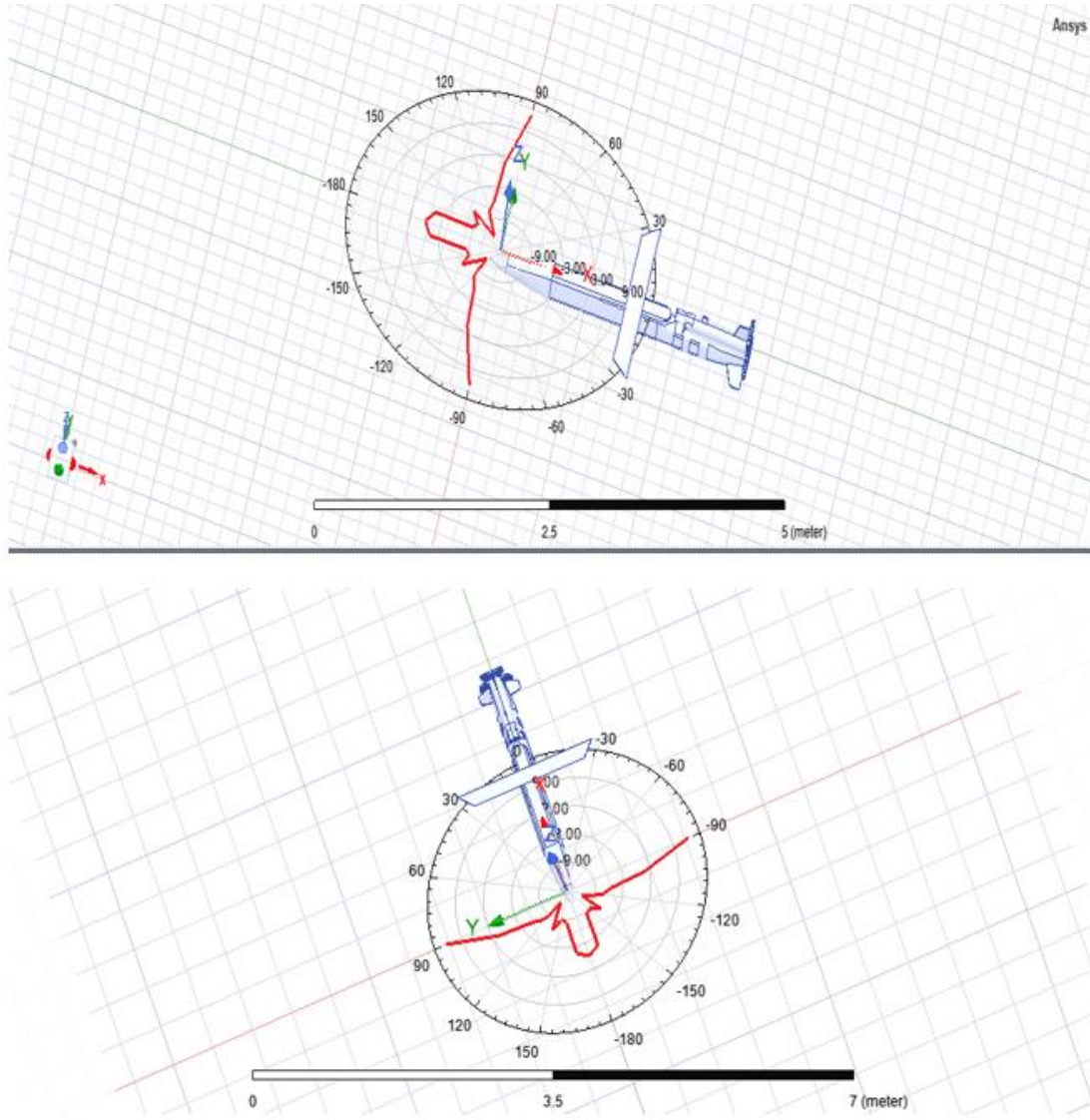
Şekil 2.11 1.5 GHz'de Monostatik Radar Kesit Alanı Sonucu

Frekans 2.75 GHz iken alınan analiz sonucu,



Şekil 2.12 2.75 GHz'de Monostatik Radar Kesit Alanı Sonucu

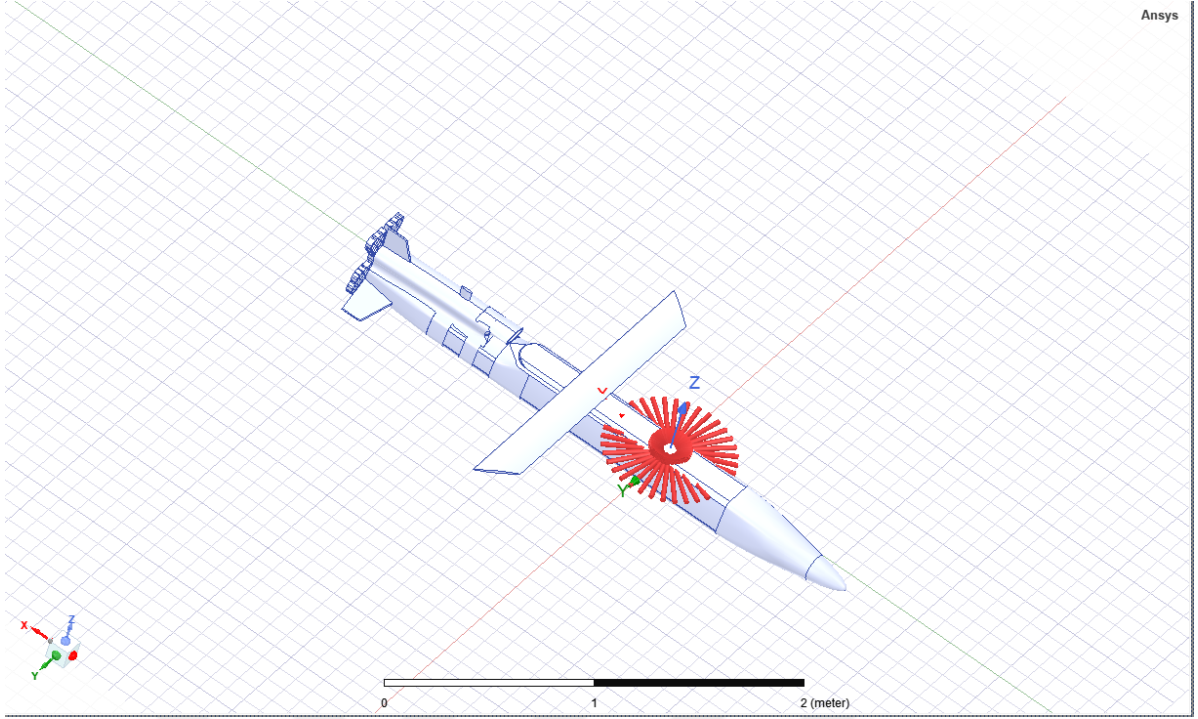
Çıkan analiz sonucunun platformun üstüne yerleştirilmesiyle oluşan görüntü Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 2.75 GHz RKA sonucunun MALD platformuna uygulanması

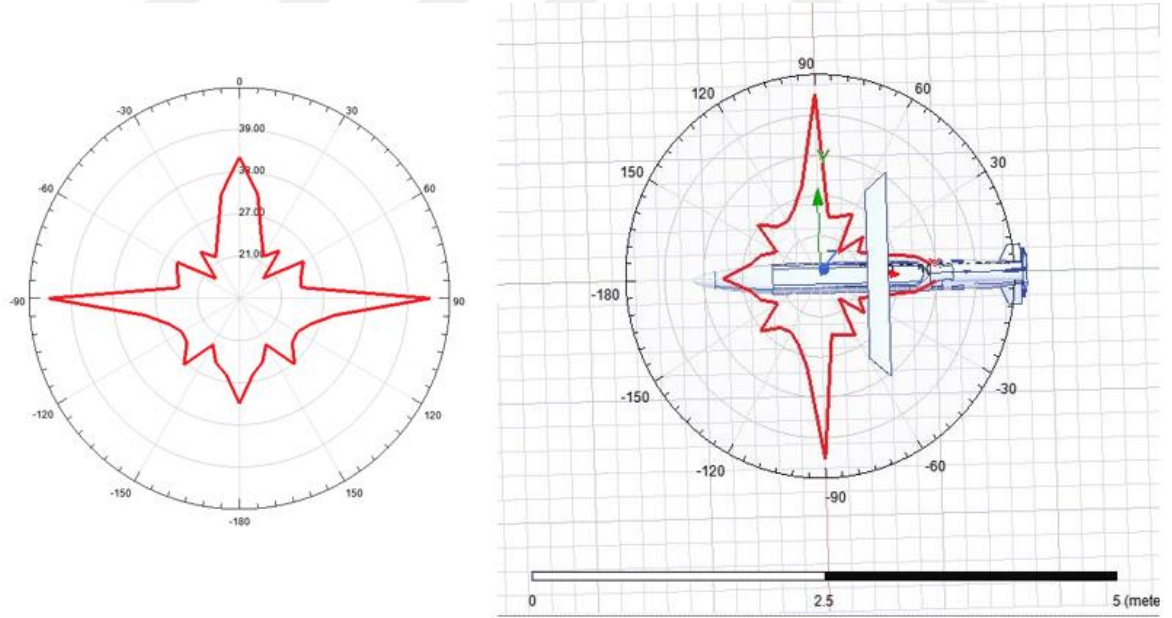
Çıkan analiz sonuçlarına göre uçağın burun kısmından radar kesit alanı gözlemlendiğinde uçağın kanatlarında radar kesit alanı düşük seviyelerde gözlemlenirken, burun kısmında daha yüksek bir radar kesit alanı gözlemlenmiştir.

Aynı tarama aralıklarında phi açısının aralığı 0-360 derece yapıp, theta açısı 90 derece bırakılıp uçağın gövde kısmından radar kesit alanının sonuçları gözlemlenmiştir.



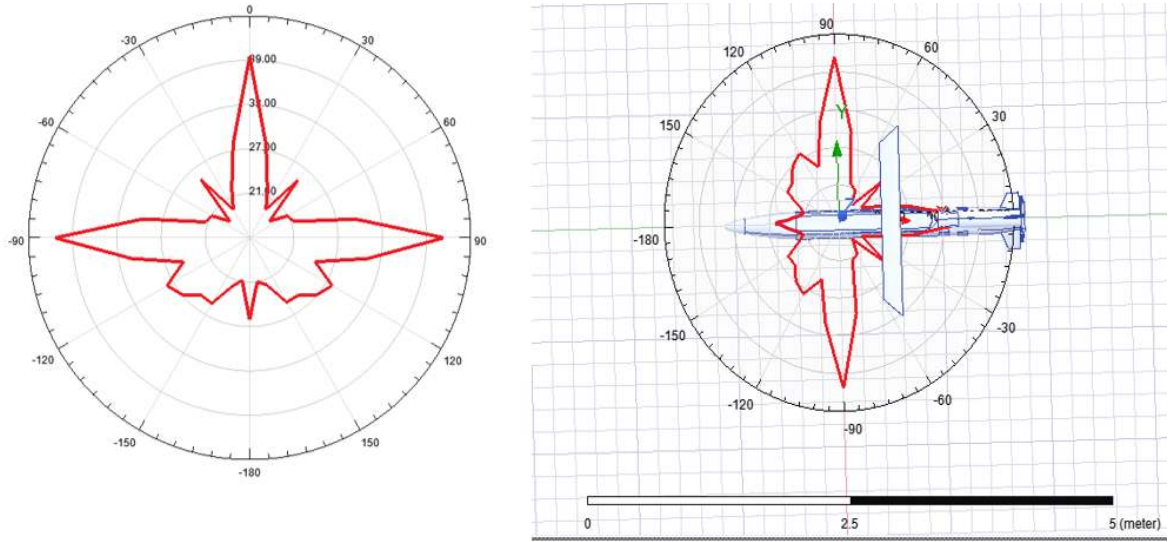
Şekil 2.14 MALD platformu 360 derece RKA ışıması

1 GHz için Monostatik radar kesit alanı grafiği Şekil 2.15’ de gösterilmiştir.



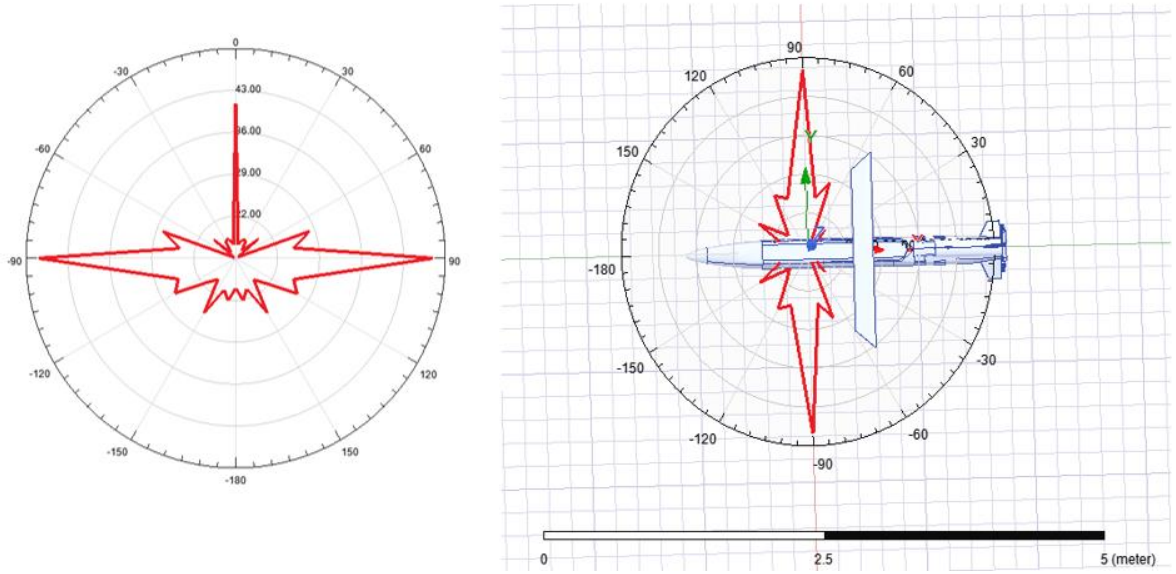
Şekil 2.15 1 GHz için RKA analiz sonucu

2 GHz için Monostatik radar kesit alanı grafiği Şekil 2.16 'da gösterilmiştir.



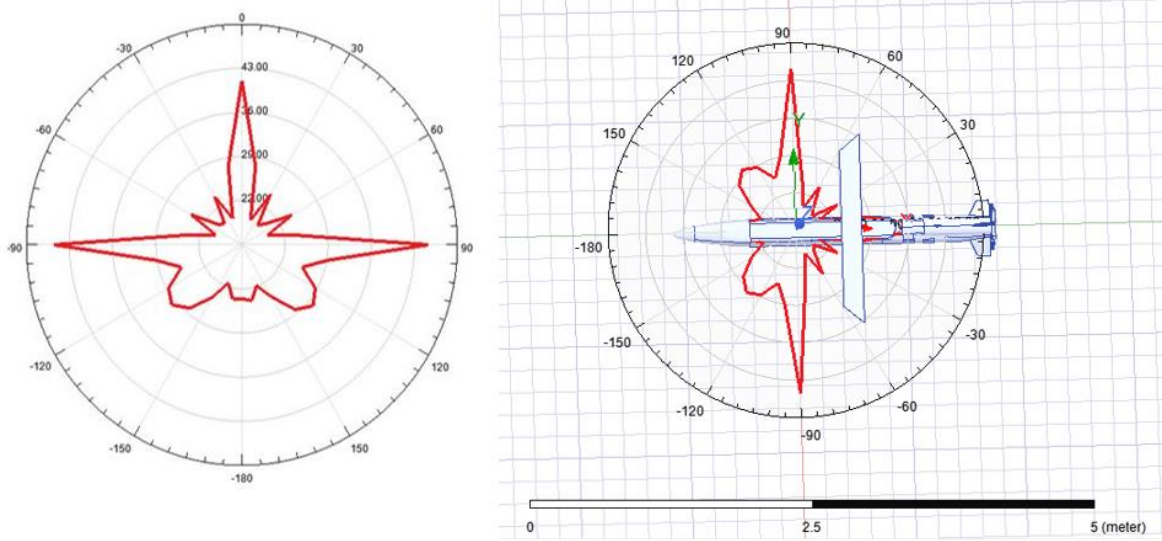
Şekil 2.16 2 GHz için RKA analiz sonucu

3 GHz için Monostatik radar kesit alanı grafiği Şekil 2.17 'de gösterilmiştir.



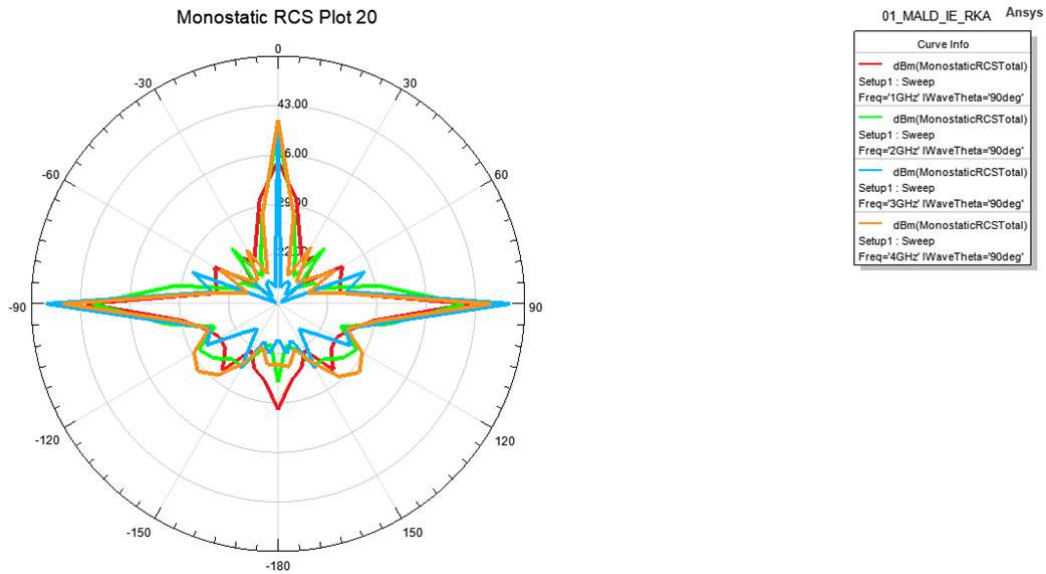
Şekil 2.17 3 GHz için RKA analiz sonucu

4 GHz için Monostatik radar kesit alanı grafiği Şekil 2.18 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 4 GHz için RKA analiz sonucu

1,2,3 ve 4 GHz radar kesit alanı sonuçları aynı grafik içinde Şekil 2.19 'da gösterilmiştir.



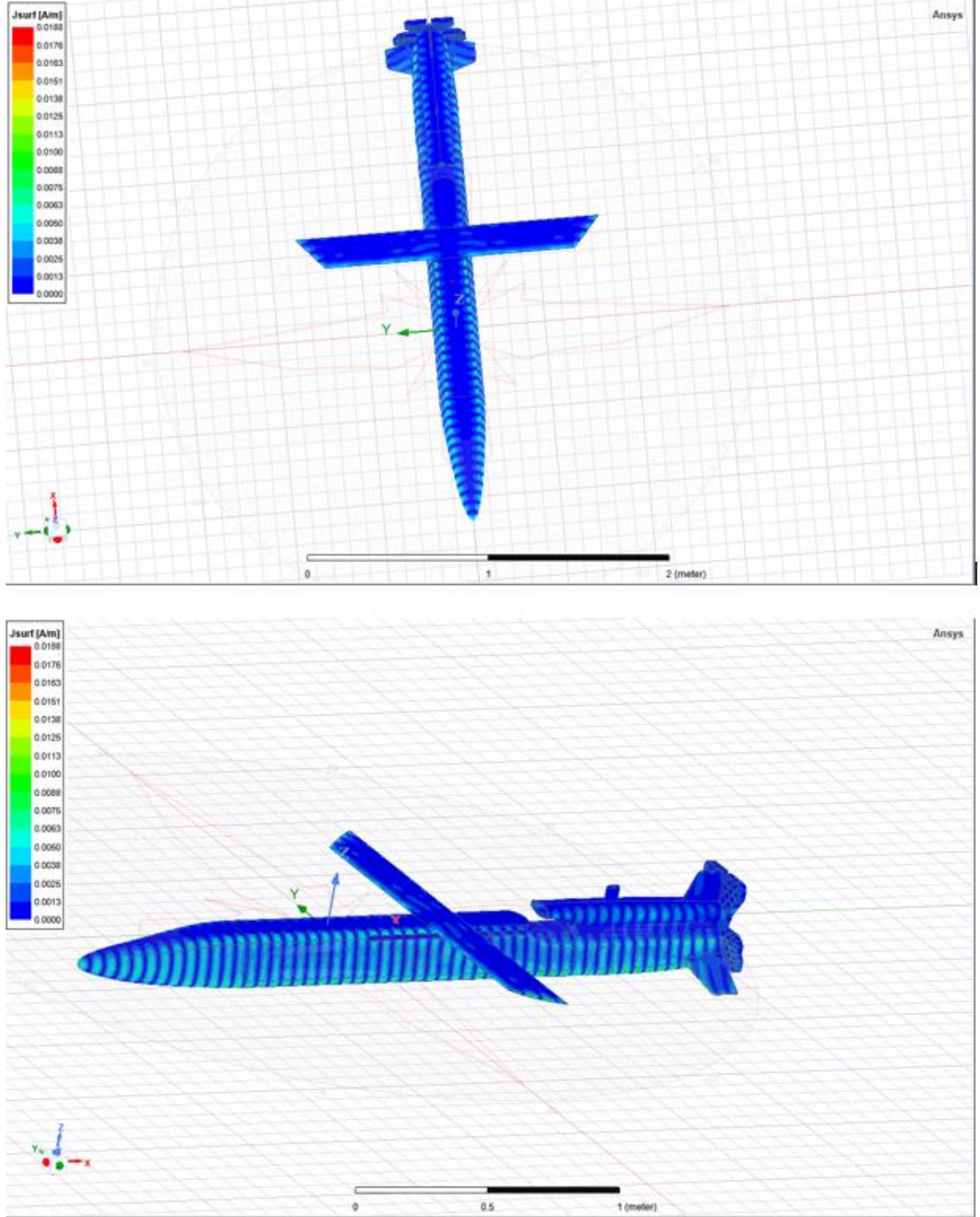
Şekil 2.19 1,2,3 ve 4 GHz radar kesit alanı sonuçlarının tek bir grafikte çizdirimi

Çıkan analiz sonuçlarına göre uçağın 360 dereceden radar kesit alanı bakıldığında uçağın kanatlarında daha yüksek bir radar kesit alanı gözlemlenmiştir. Phi derecelerine göre ortaya çıkan radar kesit alanı datalarının tablosu aşağıda gösterilmiştir. Platforma anten yerleştirmeden önce ortaya çıkan radar kesit alanı sonuçları Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 1,2,3 ve 4 GHz frekanslarında Phi derecelerine göre Monostatik Radar Kesit Alanı Analiz Sonuçları

IWavePhi (Deg)	1 GHz (dBm)	2 GHz (dBm)	3 GHz (dBm)	4 GHz (dBm)
0	31.85	26.78	30.14	38.75
10	18.28	26.18	29.44	34.59
20	22.47	32.14	31.51	36.34
30	25.72	30.38	30.20	37.78
40	24.43	34.63	27.89	35.54
50	16.57	31.49	35.52	38.08
60	23.03	35.91	29.54	36.39
70	28.95	31.59	37.38	32.15
80	27.77	26.66	31.11	33.15
90	42.14	42.23	27.93	37.82
100	28.99	29.35	36.97	39.57
110	23.50	25.78	31.46	37.47
120	17.71	26.60	30.70	28.85
130	24.13	31.64	30.93	37.39
140	20.85	31.66	33.77	42.06
150	18.51	19.99	28.44	37.54
160	22.44	32.16	32.95	33.34
170	19.93	21.76	31.98	36.80
180	29.46	29.26	32.88	32.53
190	21.73	25.75	24.93	25.69
200	17.02	24.03	29.56	37.63
210	19.26	26.24	32.86	39.38
220	16.59	27.48	34.01	38.21
230	22.78	23.02	25.92	34.05
240	19.35	25.11	34.82	34.23
250	24.82	29.81	30.72	34.68
260	29.86	28.64	34.55	34.68
270	41.86	44.51	33.24	37.29
280	25.31	23.59	35.55	35.47
290	28.29	23.24	36.70	37.74
300	22.80	17.62	31.81	33.68
310	8.91	24.95	29.70	35.87
320	24.28	30.52	31.84	39.26
330	23.35	30.25	33.20	39.06
340	15.25	30.59	35.58	35.39
350	11.09	32.44	34.37	26.70
360	31.85	26.78	30.14	38.75

Akı alanının analiz sonucu aşağıdaki Şekil 2.20’de gösterildiği gibi oluşmuştur. Şekil 2.20’ ye bakıldığında gövde kenarlarında ve kanat uçlarında akı yoğunluğu görülmüştür.



Şekil 2.20 MALD PLatformu Akı Analizi

3. ANTEN YAPILARI

Antendeki toplam radar kesit alanı, Yapısal Mod RKA ve Anten Modu RKA olarak iki ayrı bileşene ayrılabilir. Yapısal mod RKA, antenin yüzeyine düşen elektromanyetik sinyalin bir kısmının uzaya geri saçılmasıdır. Saçılmayan enerji, antenin etkisi sebebiyle soğurulur. Soğurulan enerji, anten modu RKA'sından dolayı yaşanan empedans uyumsuzlukları sebebiyle tekrar uzaya saçılmış olur. Bu bölümde, hava konuşlu yanıltma platformunun radar kesit alanını arttıracak uygun anten modelinin bulunması adına 3 farklı anten tipi üzerinde analiz yapılmış ve uygun bulunan anten platformun üzerine uygulanmıştır.

3.1.Mikroşerit Anten

Mikroşerit antenler, performansı, hafifliği, sağlamlığı ve imalat kolaylığı sebebiyle sık kullanılan bir anten türüdür. Tasarım kolaylığı, hafiflik, uygulanabilirlik, düşük maliyet sebebiyle askeri araçlardan uzay alanına kadar birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. [27]

Boyutlarına, şekillerine ve kullanılan dielektrik alt tabakaya bağlı olarak megahertz ile gigahertz arasında geniş bir frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanabilmektedirler. Bir mikroşerit anten, iki iletken yüzeyden oluşur. Bu yüzeyler, anten düzlemi ve yer düzlemidir. Anten düzlemi ve yer düzlemi arasında ise bir dielektrik tabaka bulunur.

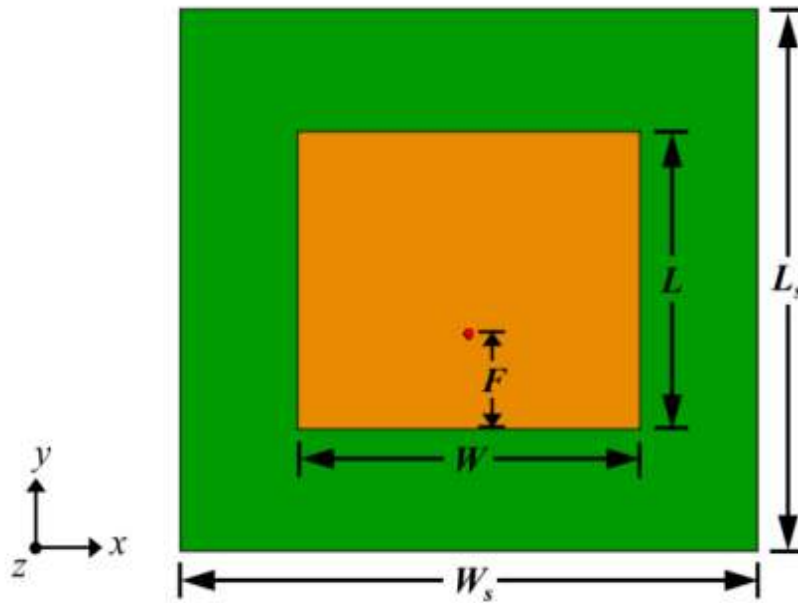
Mikroşerit antenlerin çeşitli beslenme methodları bulunur. Bu methodlar temaslı ve temassız beslenme methodu olarak iki kategoriye ayrılır. Temaslı beslenme methodunda, enerji mikroşerit hat kullanılarak doğrudan yamayı besler. Temassız beslenme methodunda ise, mikroşerit hat ile yama arasındaki gücü aktarmak için elektromanyetik alan kuplajı yapılır. En sık kullanılan besleme teknikleri, mikroşerit hat, koaksiyel besleme, açıklık kuplaj ve yakınlık kuplajdır.

Mikroşerit hat beslemesinde, mikroşerit yamanın ortasından yamaya göre genişlik olarak küçük bir iletken şerit bağlanır. Yamanın iç tarafındaki kesiklerin amacı, ek bir elemana gerek kalmadan besleme hattının empedansını yamanın empedansı ile eşleştirmektir.

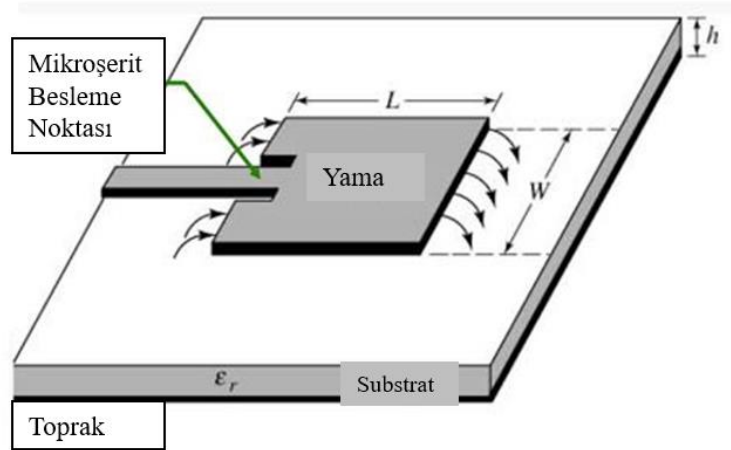
Mikroşerit yama antenlerini beslemek için kullanılan tekniklerden bir diğeri koaksiyel beslemedir. Koaksiyel besleme, koaksiyel konektörün iletken kısmında, dielektrik hattı boyunca uzanır ve dıştaki iletken toprağa bağlıyken yamaya lehimlenir.[28]

Koaksiyel beslemenin avantajları, üretiminin kolay olması, düşük radyasyona sahip olması ve yamanın içinde istenilen noktaya koyulabilmesidir. Bununla birlikte, büyük bir dezavantaj, dar bant genişliği sağlaması ve alt tabakada bir delik açılması gerektiğinden konnektörün zemin düzleminin dışına çıkması nedeniyle modellenmesinin zor olmasıdır, bu nedenle kalın alt tabakalar için tamamen düzlemsel hale gelmez ($h > 0.02\lambda_0$) . Ayrıca bu durum, giriş empedansını daha endüktif hale getirerek eşleştirme sorunlarına yol açar. Bu çalışmada, modellemesi zor olduğu için ve alt tabakada delik açılması gerektiğinden MALD platformuna uygun olmadığı düşünüldüğü için koaksiyel tip besleme kullanılmamıştır.

Açıklık kuplaj beslemesinde, yama ve mikroşerit besleme hattı bir yer düzlemi ile ayrılır. Yama ve besleme hattı arasındaki kuplaj, zemin düzlemindeki bir açıklık üzerinden yapılır. Yakınlık kuplaj beslemesi, elektromanyetik bağlantı şeması olarak da adlandırılır. Besleme hattı iki dielektrik alt tabaka arasında yer alır. Bu besleme tekniğinin avantajı, mikroşerit yama anteninin kalınlığındaki artış nedeniyle yüksek bir bant genişliği (%13'e kadar) sağlamasıdır.[29]



Şekil 3.1 Mikroşerit Anten Boyutlarının Gösterimi



Şekil 3.2 Mikroşerit Antende besleme ağının gösterimi

Mikroşerit anten tasarımı için temel performans kriterleri; yansıma katsayısı, bant genişliği, radyasyon paterni, yüzey akımı, anten kazancı, giriş empedansı, dönüş kaybı ve polarizasyon olarak sıralanabilir. İlk olarak dielektrik malzeme belirlenmelidir. Dielektrik yüzeyler, kalınlık, bant genişliği gibi gereksinimleri karşılamalı ve belirli bir uygulama için ihtiyaç olanı seçilmelidir. Dielektrik yüzeyler ve karakteristikleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1 Dielektrik yüzeyler ve karakteristikleri

Madde	Dielektrik katsayısı	Kayıp tanjant
PTFE	2.1	0.0004
Polypropylene	2.18	0.0003
Teflon Cam	2.55	0.0015
Teflon Quartz	2.47	0.0006
Epoxy/ Cam (FR4)	4.4	0.02
LCP	2.1	0.005
Benzocyclobutane	2.6	0
Duroid 6010	10.7	0.0060
Naylon	3.6	0.0083
Roger 4350	3.48	0.004
RT-Duroid	2.2	0.0009
Köpük (Foam)	1.05	0

Kayıp tanjant, sinyal iletim hattında ilerlerken sinyal kaybının bir ölçüsüdür. Malzeme veri sayfaları ve kart üreticileri genellikle bu sinyal kaybını dağılım faktörü olarak adlandırır. Bu tablodan bizim için uygun olan yüzey Epoxy/Glass(FR4) olarak belirlenmiştir.

Mikroşerit antenler, yama, zemin düzlemi, alt tabaka ve besleme parçası olmak üzere 4 parçanın birleşmesinden oluşan tek katmanlı bir yapıdır. Bu antenler, tek elemanlı rezonans antenleri olarak adlandırılabilir. İdeal bir mikroşerit antenin tasarımı için gerekli olan 3 önemli parametre; çalışma frekansı(f_0), yüzeyin dielektrik sabiti(ϵ_R) ve dielektrik malzemenin yüksekliğidir.

Mikroşerit anten tasarlarken yapılması gereken hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir.

Şekil 3.1'deki mikroşerit antenin genişliğini hesaplamak için,

$$W = \frac{c}{(2f_0) \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (33)$$

Bu formülde ϵ_R dielektrik malzemenin geçirgenliğini gösterir, f_0 ise rezonans frekansını belirtir. Dielektrik sabitini hesaplamak için,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right) \quad (34)$$

h antenin substrat kalınlığını gösterir, W ise yamanın genişliğini gösterir.

Antenin etkili uzunluk ölçümünü hesaplamak için,

$$L_{eff} = \frac{c}{(2f_0) \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (35)$$

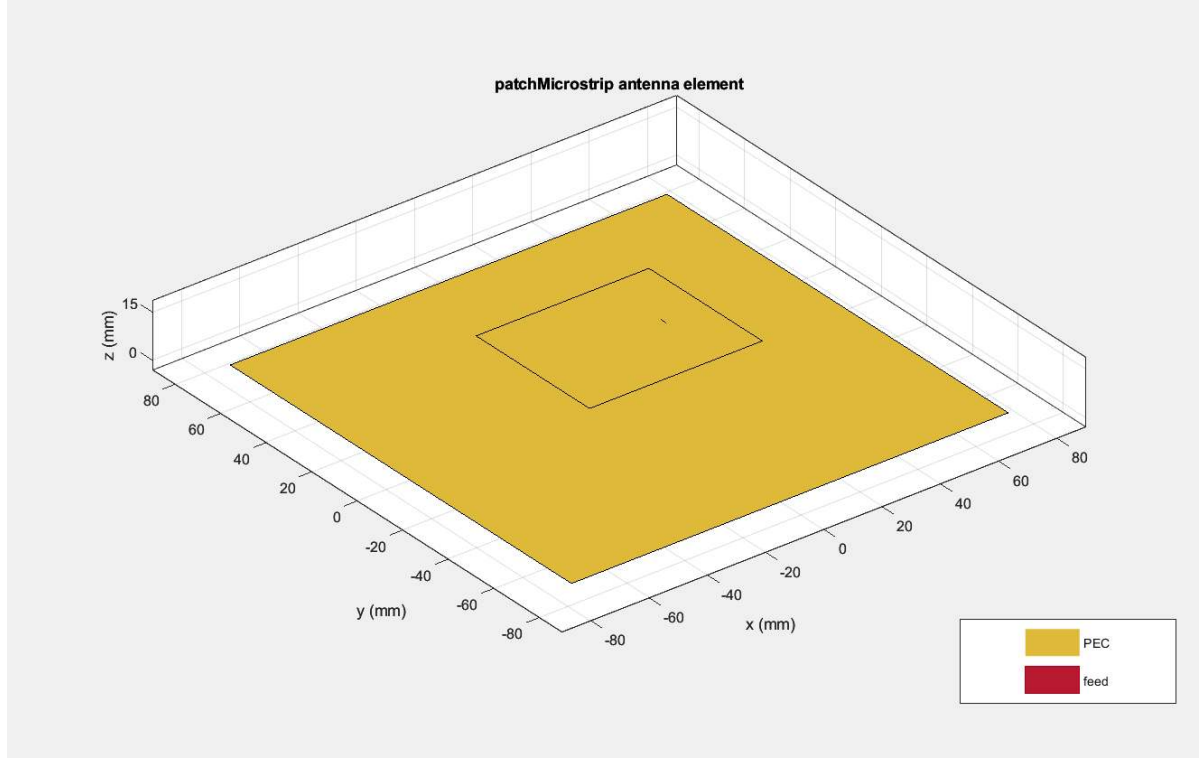
L yamanın uzunluğunu gösterir. Fiziksel uzunluk hesabı için,

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (36)$$

Mikroşerit yamanın gerçek uzunluğunu hesaplamak için,

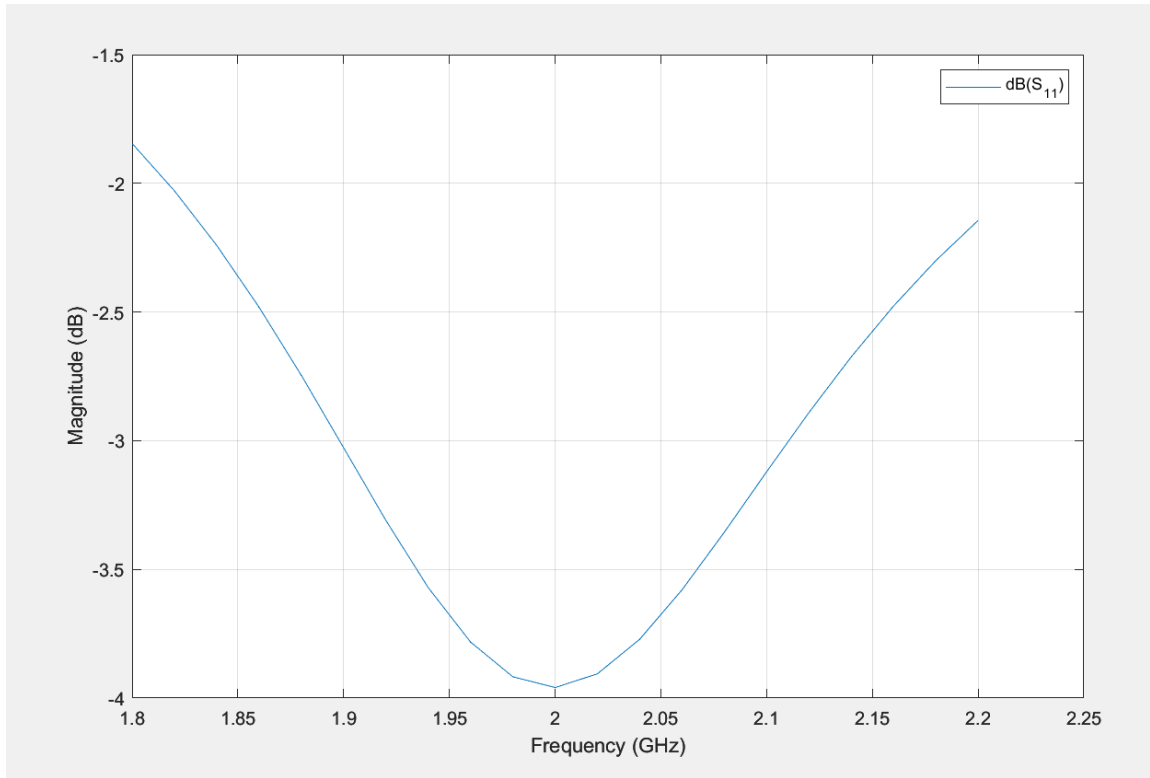
$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (37)$$

Bu tezde kullanılan mikroşerit antenin MATLAB programındaki görüntüsü Şekil 3.3'deki gibidir.

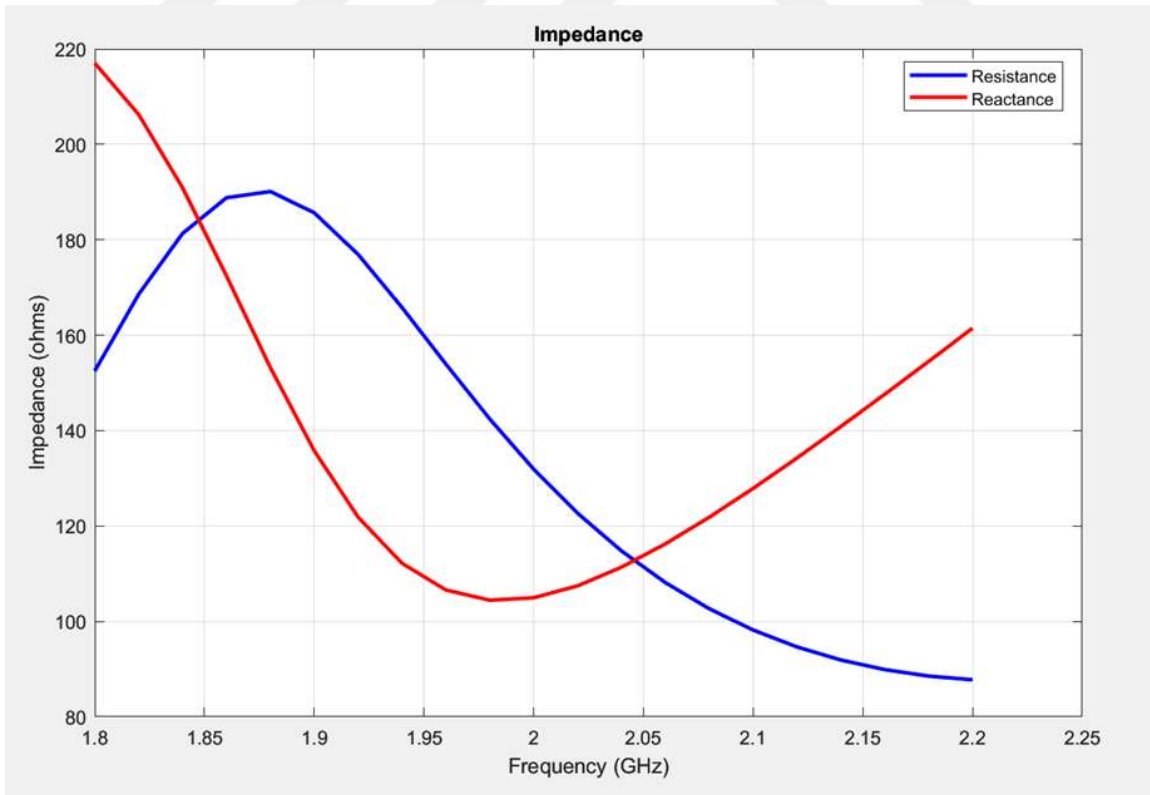


Şekil 3.3 Mikroşerit Antenin Matlabda gösterimi

Oluşturulan mikroşerit antenin MATLAB programı üzerindeki S(1,1) sonuçları Şekil 3.4'deki gibidir. Saçılma parametreleri S parametresi olarak adlandırılır. Saçılma parametreleri, elektrik sisteminde bulunan portların arasındaki giriş çıkış ilişkilerini tanımlar. Yüksek frekanslarda, portlar arasındaki ilişkiyi voltaj veya akımdan ziyade dalgalar cinsinden tanımlamak gereklidir bu yüzden S parametrelerinde güç dalgaları kullanılır. Seçilen antenin merkez frekansı 2 GHz olduğu için S(1,1) grafiğindeki dB değerinin en düşük olduğu nokta 2 GHz olmuştur. Antenler tipik olarak düşük kayıplı olacak şekilde tasarlandığından, ideal olarak antene iletilen gücün büyük bir kısmı yayılır. S(1,1) parametresi, antenden ne kadar güç yansıtıldığını temsil eder ve bu nedenle yansıma katsayısı olarak bilinir.

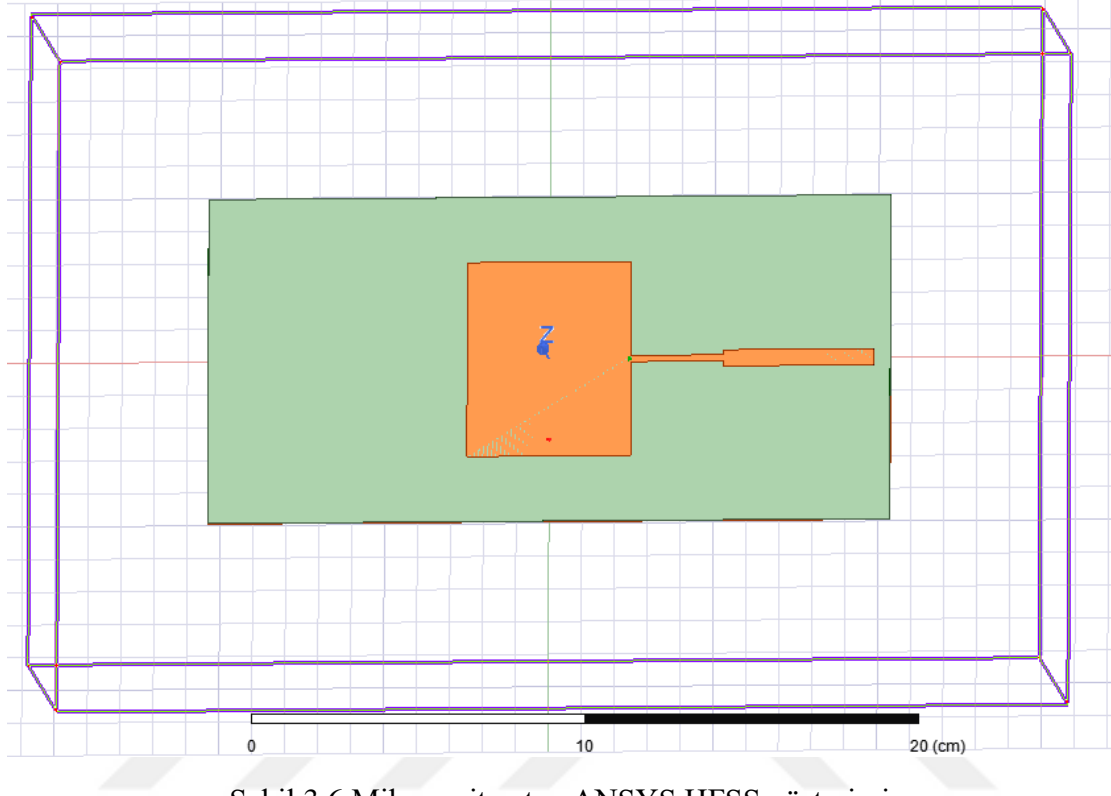


Şekil 3.4 Mikroşerit anten S(1,1) grafiği



Şekil 3.5 Mikroşerit anten resistans-reaktans grafiği

Bu tezde kullanılan ve analizi gerçekleştirilen mikroşerit antenin ANSYS HFSS'deki gösterimi Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 Mikroşerit anten ANSYS HFSS gösterimi

Bu çalışmada kullanılan antenin ölçüleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Mikroşerit antenin ölçüleri

Anten Ölçüleri	
patchX	5.93 cm
patchY	4.98 cm
Substrat Ölçüleri	
subH	0.1575 cm
subX	9.9 cm
subY	20.73 cm
Feed Ölçüleri	
EdgeFeed Genişliği	0.192 cm
EdgeFeed Uzunluğu	2.81 cm
Feed Genişliği	0.493 cm
Feed Uzunluğu	4.569 cm

Antenin radar kesit alanı formülü,

$$\sigma = [\sqrt{\sigma_s} + \sqrt{\sigma_e} \exp 1]^2 \quad (38)$$

σ_s , yapısal saçılma teriminin radar kesiti ve σ_e , antenin etkin yankı alanıdır. σ_e değeri, belirli özel koşullar için,

$$\sigma_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G^2 \quad (39)$$

G burada antenin kazancını göstermektedir.

$$\sigma = \frac{\lambda^2 G^2}{\pi} \quad (40)$$

Anten kazancını hesaplamak için,

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(4\pi\eta A/\lambda^2) \quad (41)$$

G_{dB} anten kazancıdır, η verimliliği, A fiziksel açıklık alanıdır ve λ sinyalin dalga boyudur. Açıklık 5 olursa, dalga boyu 0,5 m'dir ve verimlilik %80'dir. Bu antenin radar kesit alanı,

$$\sigma = \frac{\lambda^2 G^2}{\pi} = \frac{(0.5)^2 25}{3.14} = 2 \text{ dBm}^2 \quad (42)$$

Anten yapılarının uçağın veya füzenin gövdesine entegre edilebilmesi için objenin şeklini alması gerekmektedir. Yerleştirileceği objenin şeklini alabilmesi ve etkisinin artması için antenler konformal olarak üretilmelidir. Konformal anten yapısı, uçakların, otomobillerin veya gemilerin aerodinamiğini iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Konformal antenler, uygulandığı yerin şekline göre silindirik, küresel veya konik olabilirler. Düz olarak dizilen bir anten yapısına göre konformal anten yapısı daha iyi bir görüş alanı sunar. Günümüz uçakları, navigasyon, iletişim sistemleri, alet iniş sistemleri, radar altimetre vb. gibi birçok antene sahiptir. [30] Tipik bir askeri uçakta 20'ye kadar farklı anten veya daha fazlası olabilir ve bu da önemli ölçüde sürüklenmeye ve artan yakıt tüketimine neden olur. Dolayısıyla bu antenlerin tasarımı geniş bantlı hale getirilip ve bazı anten fonksiyonları aynı üniteye birleştirilip, uçak kaplamasına entegre edilmesi gerekmektedir. Uydu iletişimi ve askeri havadan gözetleme radarları gibi işlevler için gerekli olan durumlar için uyumlu antenlere olan ihtiyaç daha da belirgindir. [31]

Hafifliği, düşük profili, düşük maliyeti, mikrodalga devresi ile entegre edilebilirliği ve basit üretimi nedeniyle konformal mikroşerit anten dizisi, diğer sistemler arasında daha çok tercih edilen bir seçimdir. Son teknolojiyi kullanarak hesaplanan ve elektromanyetik araçlarla desteklenen mikroşerit antenler için verimli tasarım tekniklerinin geliştirilmesi, yüksek doğruluk sonuçlarıyla birlikte hesaplama süresinde azalma sağlayan programlar geliştirilmiştir. Bu programlardan en önemlileri, Sonlu Elemanlar Methoduna dayalı

ANSYS HFSS programı ve Sonlu Entegrasyon Tekniği'dir. İstenilen yapıların analizlerini gerçekleştirebilmek için, bir anten sentezinin, simülasyon ve sonuç sürecinin ve modelin parametrelerinin değiştirilmesinin gerçekleştirildiği bir algoritma tarafından yönlendirilmesi gerekir. Bu çalışmada, analizlerin yapılması için Ansys HFSS programı kullanılmıştır. Ansys HFSS, yüksek frekanslı elektronik ürünlerin tasarımı ve benzetimi için elektromanyetik simülasyon yazılımıdır. Bu yazılım, anten, anten dizisi, RF veya mikrodalga bileşenleri, yüksek hızlı bağlantılar, filtreler, konnektörler, entegre devre paketleri ve PCB'ler gibi yüksek frekanslı elektronik ürünlerin tasarımını ve simülasyonunu yapmak için özel olarak tasarlanmıştır. Ansys HFSS, yüksek hassasiyetli elektromanyetik çözümler sağlayarak, bu ürünlerin doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli olan elektromanyetik davranışların analizini gerçekleştirir. [32]

Konformal antenler, bir uçağın gövdesi gibi kavisli bir yüzeyi düzensiz bir yüzeyin şekline uyacak şekilde tasarlanmış bir anten türüdür. Bu antenler, tipik olarak düz yüzeylere monte edilen geleneksel antenlerin tersidir. Konformal antenler, geleneksel antenlere göre çeşitli avantajlar sağladıkları için havacılık ve askeri iletişim sistemleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, konformal antenler, harici anten yapılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak bir hava taşıtındaki sürtünmeyi azaltabilir. Ayrıca, belirli yönlerde yayılacak ve yakındaki yüzeylerden yansımaları en aza indirecek şekilde tasarlanabildikleri için gelişmiş kapsama alanı ve azaltılmış parazit sağlayabilirler.

Konformal antenler, metaller, seramikler ve polimerler gibi çeşitli malzemeler kullanılarak tasarlanabilir. Baskılı devre kartı teknolojisi ve eklemeli imalat dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak imal edilebilir. Uyumlu antenlerin tasarımı, üzerine monte edildikleri yüzeyin karmaşık geometrisi nedeniyle zor olabilir ve anten verimliliği, bant genişliği ve radyasyon modeli gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir.

Konformal mikroşerit anten tasarımında, izotropik dönüşüm teorisi tekniği kullanılır ve orijinal düzlemsel dikdörtgen mikroşerit anten (dikdörtgen koordinatları x, y, z olan) silindirik uyumlu mikroşerit anten (silindirik koordinatları ρ, ϕ, z olan) olarak değiştirilebilir. Dönüşüm formülü,

$$\rho = r + h, \phi = \frac{W}{2\rho}, z' = z \quad 90 - \phi_0 \leq \phi \leq 90 + \phi_0 \quad (43)$$

ρ silindirin yarıçapıdır ve ϕ , iletkenin merkezindeki yay parçasının gördüğü açıdır.

Bu silindir yapıli mikroşerit anten yapısının avantajı, füze ve uçak gövdelerine kolaylıkla uygulanabilmesi ve iyi bir aerodinamik performansı sunmasıdır. Faz dizi mikroşerit antenlerde, radyasyon modeli tarama yönü ile değişir. Bununla birlikte, rotasyonel simetriye sahip uyumlu diziler, en az bir boyutta tarama ile değişmeyen desenlere sahip olabilir. Eğer aktif bölge değişmiyorsa, hüzenin yönü eleman uyarılarının faz kontrolü ile hareket ettirilebilir.[33]

Silindirik veya dairesel bir eleman dizisi, ya çok yönlü bir ışın, çoklu ışınlar ya da 360° üzerinde yönlendirilebilen dar bir ışın ile hedefi 360° kapsama potansiyeline sahiptir. Bugün 360° kapsama için uygulanan çözüm, her biri 120°'lik bir sektörü kapsayan üç ayrı antendir. Bunun yerine, daha az maliyet getiren bir silindirik dizi kullanılabilir.[34] Silindir yerine geometrik bir şekil kullanılsaydı, kullanılan geometrik şeklin köşe sayısı arttıkça maksimum tarayacağı açı alanı azalacaktır. Geometrik bir şekil için tarayacağı alan hesabı formülü,

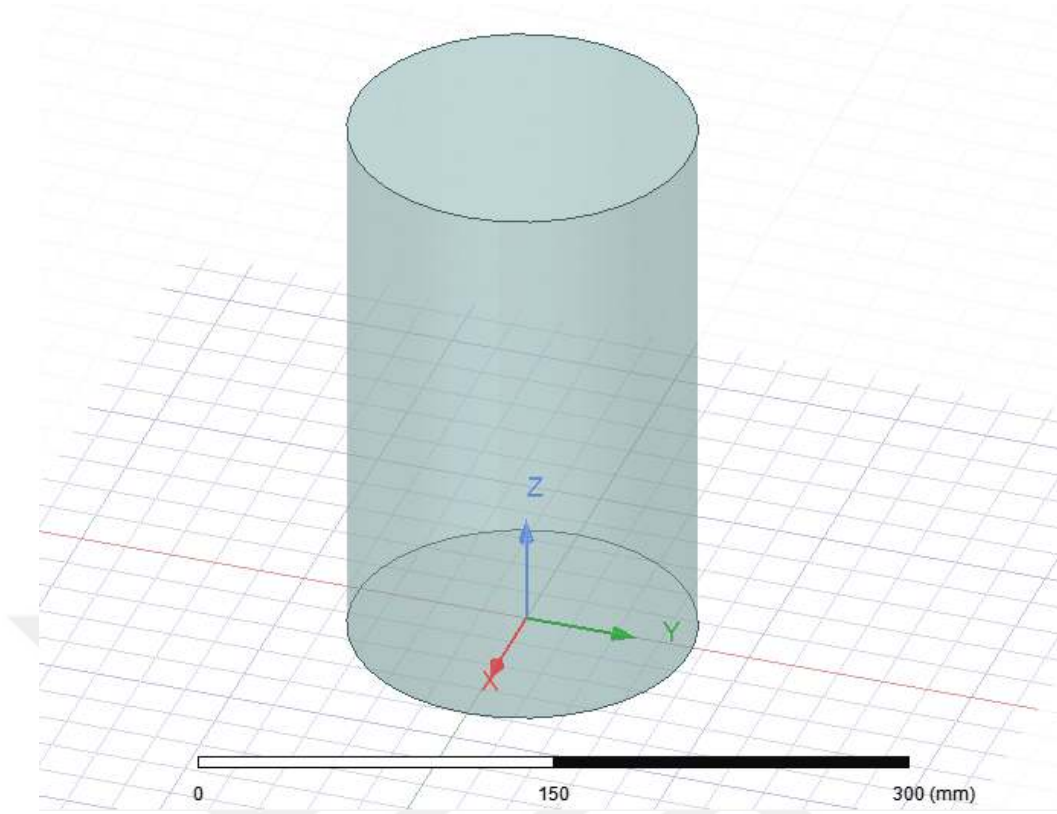
$$Alan = 2hRsin\frac{\pi}{n} \quad (44)$$

H yüksekliğini, R yarıçapını, n ise geometrinin köşe sayısını göstermektedir.

$$A_{eff,min} = hRsin\frac{2\pi}{n} \quad (45)$$

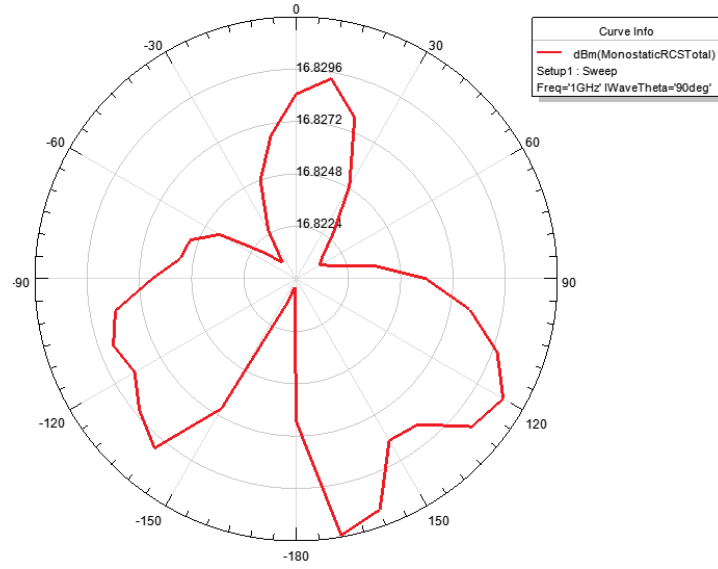
Bu formüle göre, elde edilen kazanç ve geometrinin köşe sayısı ters orantılıdır.

Bu çalışmada mikroşerit anten tasarımı kısmında gösterilen anten, HFSS programı üzerinde bir silindir obje üzerine konumlandırılarak konformal mikroşerit bir antene dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün yapılabilmesi için öncelikle Şekil 3.7'deki silindir oluşturulmuştur, silindir burada füzenin gövdesini temsil etmektedir. Füzenin gövdesine antenin oturması için antenin konformal şekile dönüştürülmesi gerekmektedir dolayısıyla anten modeli silindirin üzerinde konformal yapılarak ANSYS HFSS programında yerleştirilmiştir. 1,2,3 ve 4 GHz frekansları için bu silindir üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.



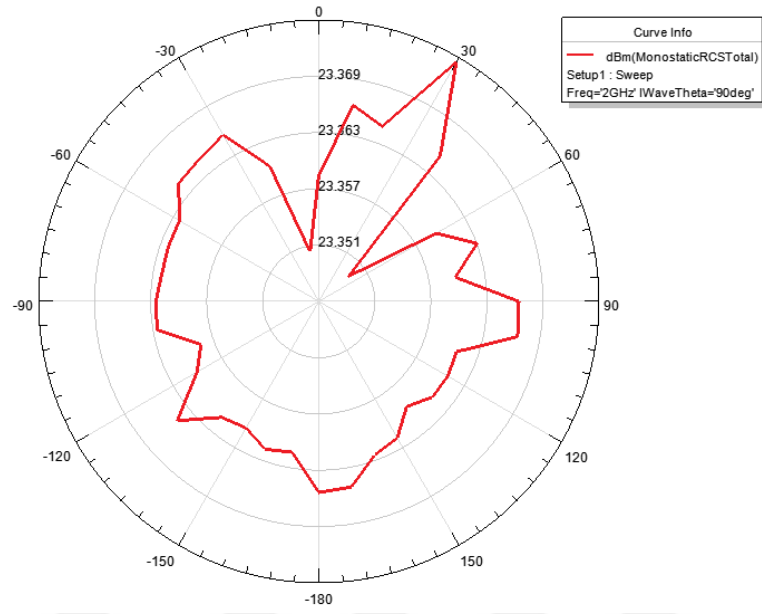
Şekil 3.7 ANSYS HFSS programında oluşturulan silindir

1 GHz için boş silindir RKA analiz sonucu,



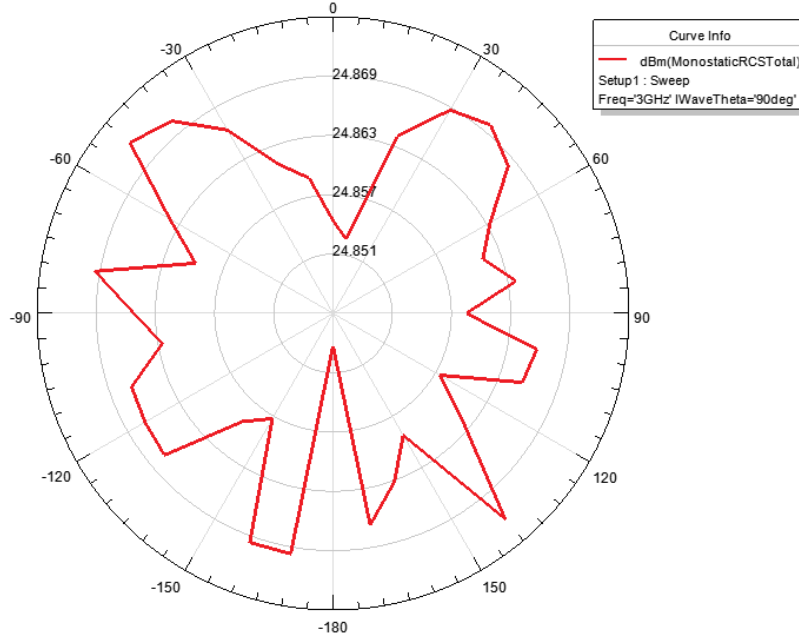
Şekil 3.8 Silindir 1 GHz RKA analizi

2 GHz için RKA analiz sonucu,



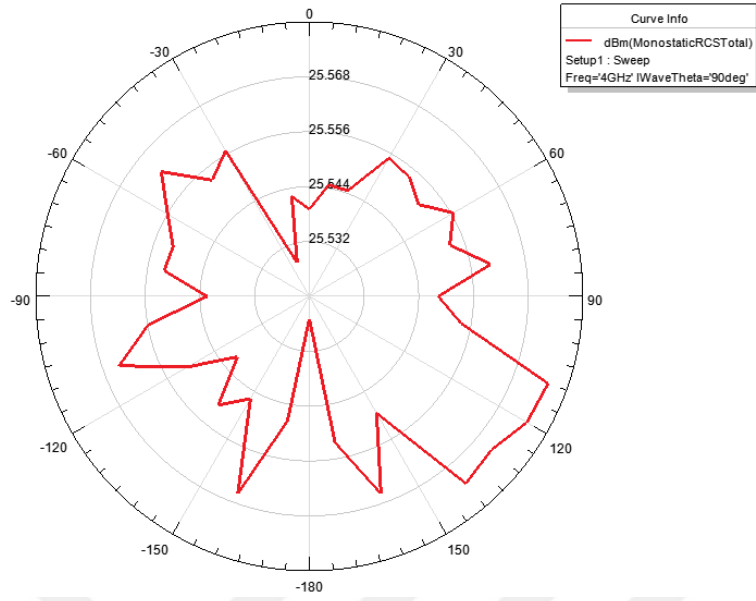
Şekil 3.9 Silindir 2 GHz RKA analizi

3 GHz için RKA analiz sonucu,



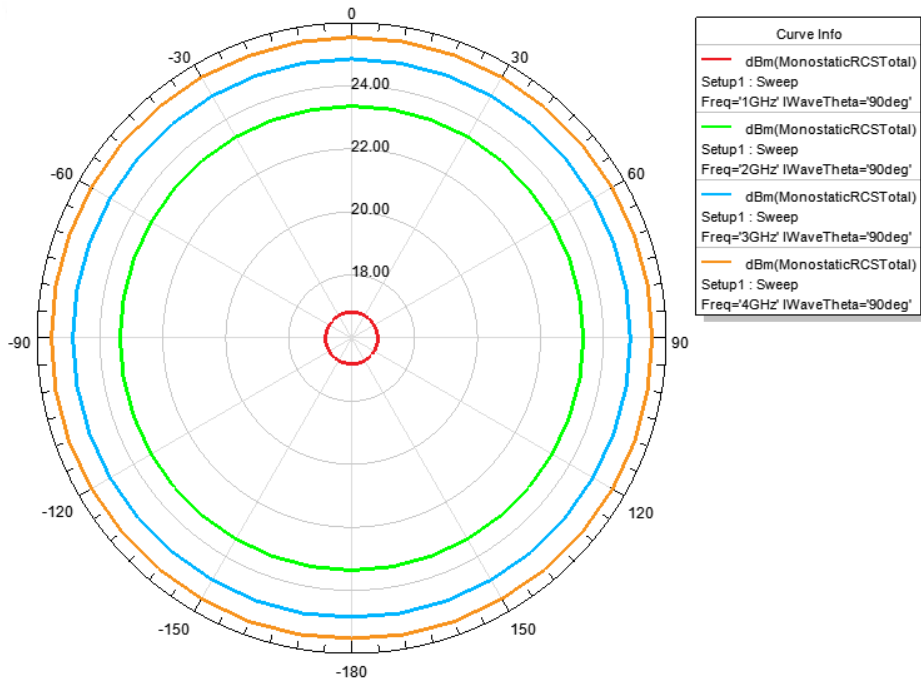
Şekil 3.10 Silindir 3 GHz RKA analizi

4 GHz için RKA analiz sonucu,



Şekil 3.11 Silindir 4 GHz RKA analizi

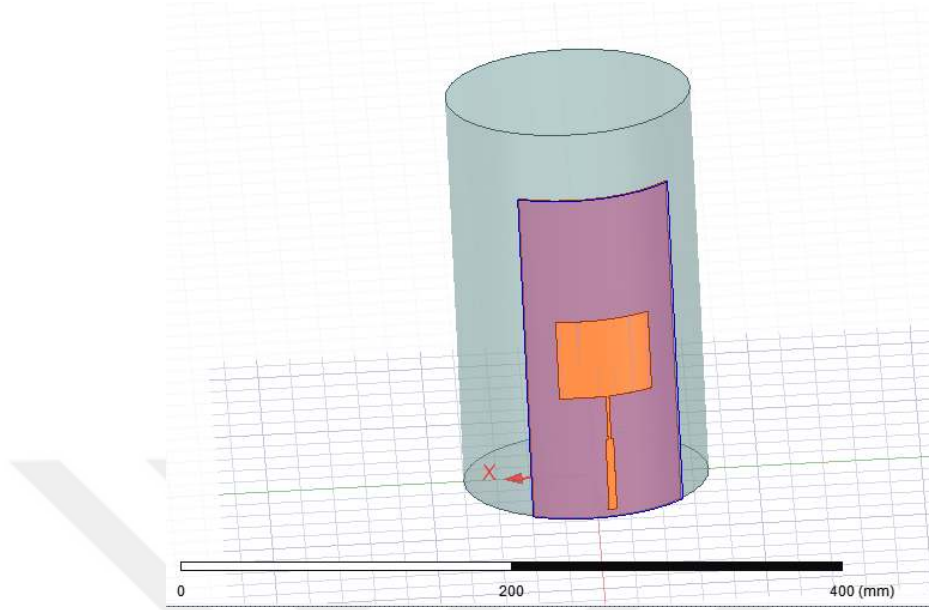
1,2,3 ve 4 GHz frekansları için analiz sonuçlarının tek grafikte gösterimi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 1,2,3 ve 4 GHz için silindir RKA sonuçlarının tek grafikte gösterimi

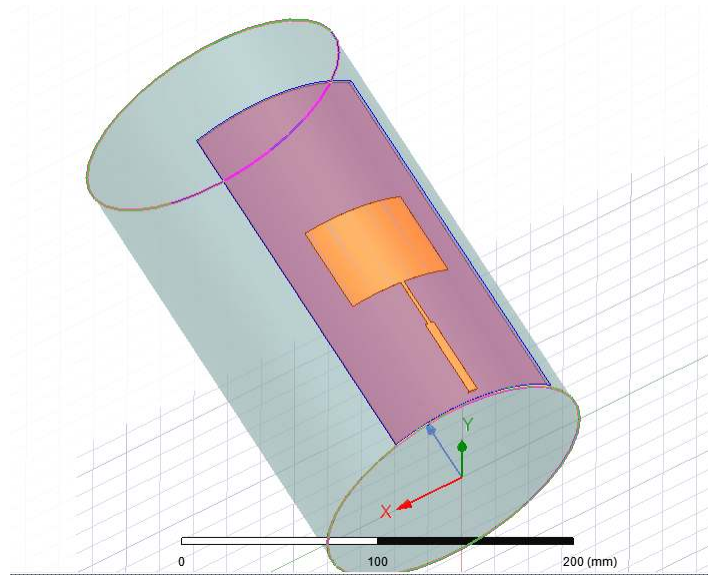
Boş silindirin radar kesit alanı, 1 GHz seviyesinde 16 dBm, 2 GHz seviyesinde 23 dBm, 3 GHz seviyesinde 24 dBm ve 4 GHz seviyesinde 25 dBm olarak gözlenmiştir.

Tasarladığımız anten ile silindirin yüzeyleri Şekil 3.13'deki gibi birleştirilmiştir.



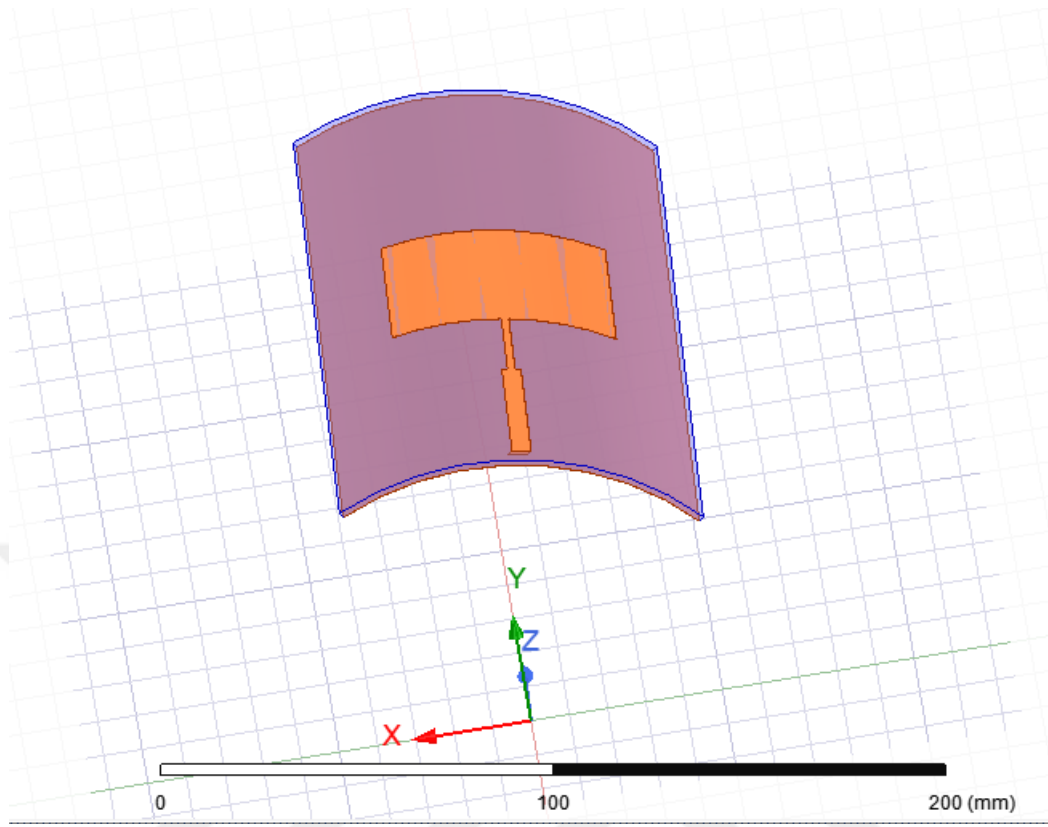
Şekil 3.13 Mikroşerit antenin silindire entegre edilmiş hali

Silindir üzerindeki mikroşerit antenin yan perspektiften görünüşü Şekil 3.14'deki gibidir.



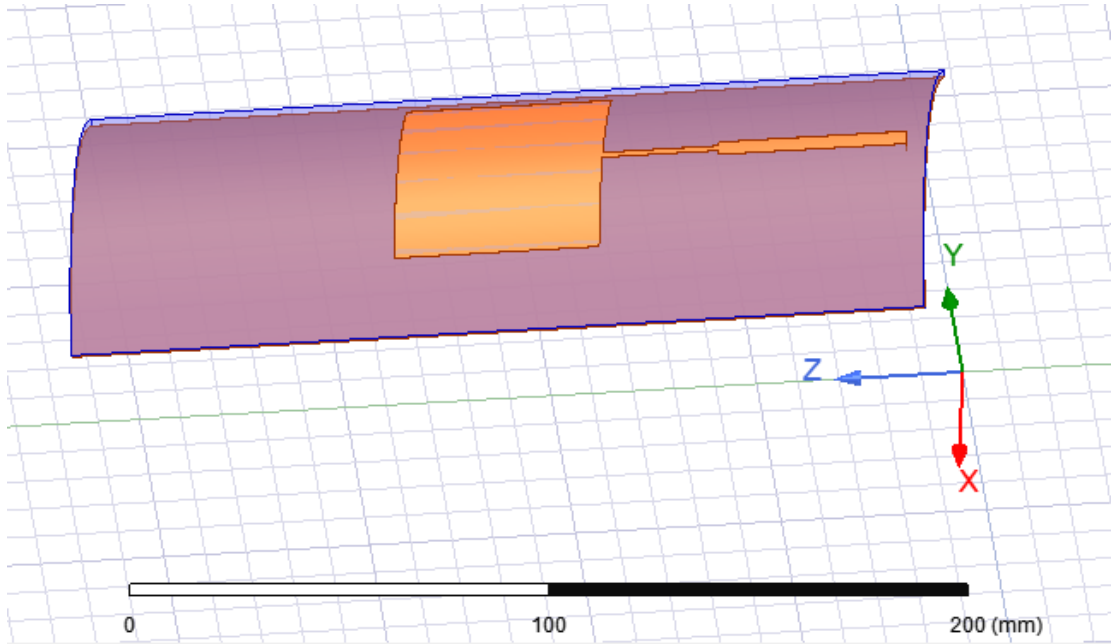
Şekil 3.14 Mikroşerit antenin silindire entegre edilmiş hali yan perspektif

HFSS programı üzerinde oluşturulan konformal mikroşerit antenin görüntüsü Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



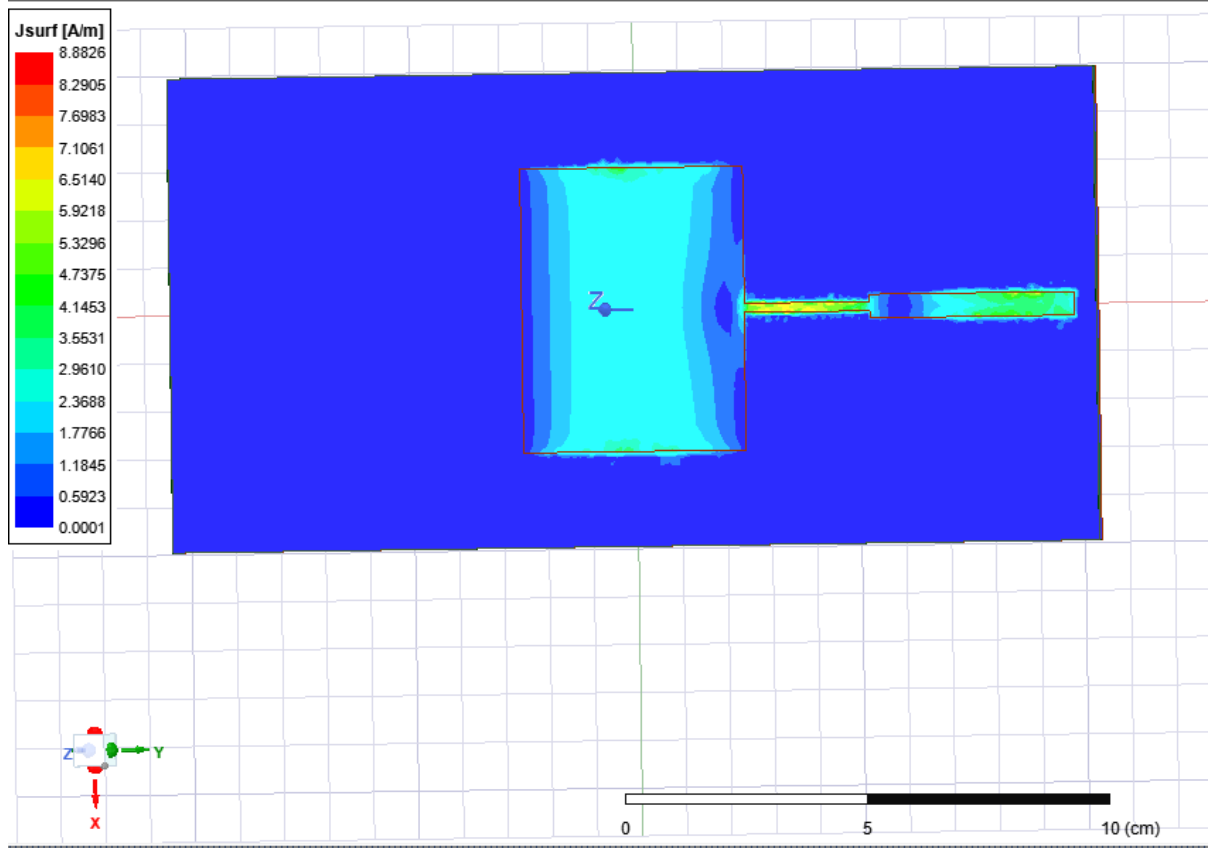
Şekil 3.15 Konformal mikroşerit anten

Konformal mikroşerit antenin yan açıdan görüntüsü Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Konformal mikroşerit anten yan perspektif

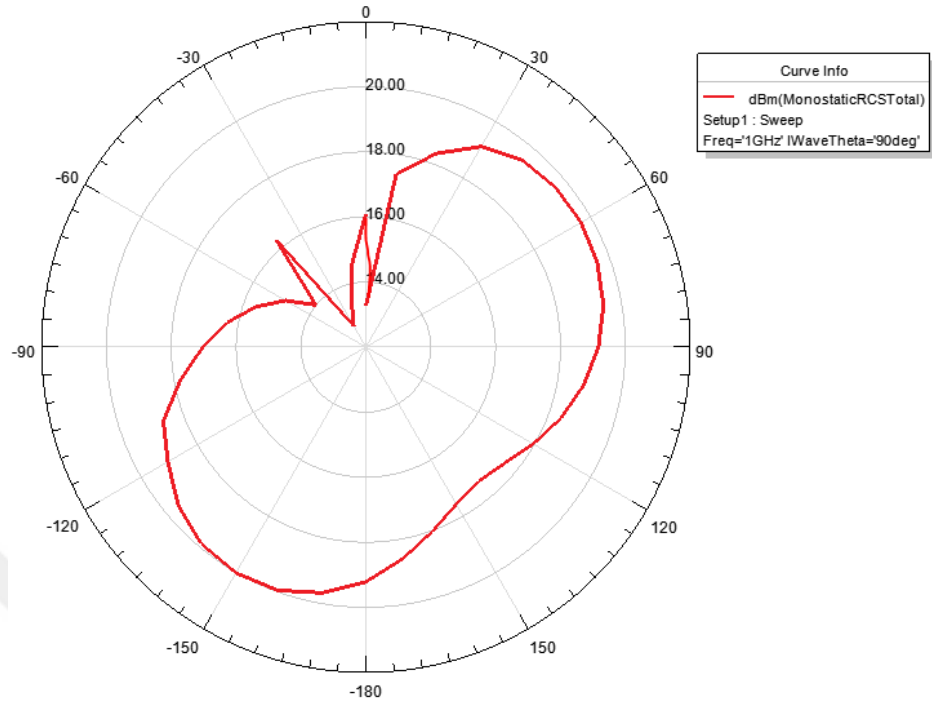
Program tarafında anten yapısında oluşturulan mesh yüzeyleri analiz edilmiştir. Oluşturulan mesh yapılarının yoğun olarak bulunduğu bölgenin patch anten kısmı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.17 Mikroşerit anten akı analizi

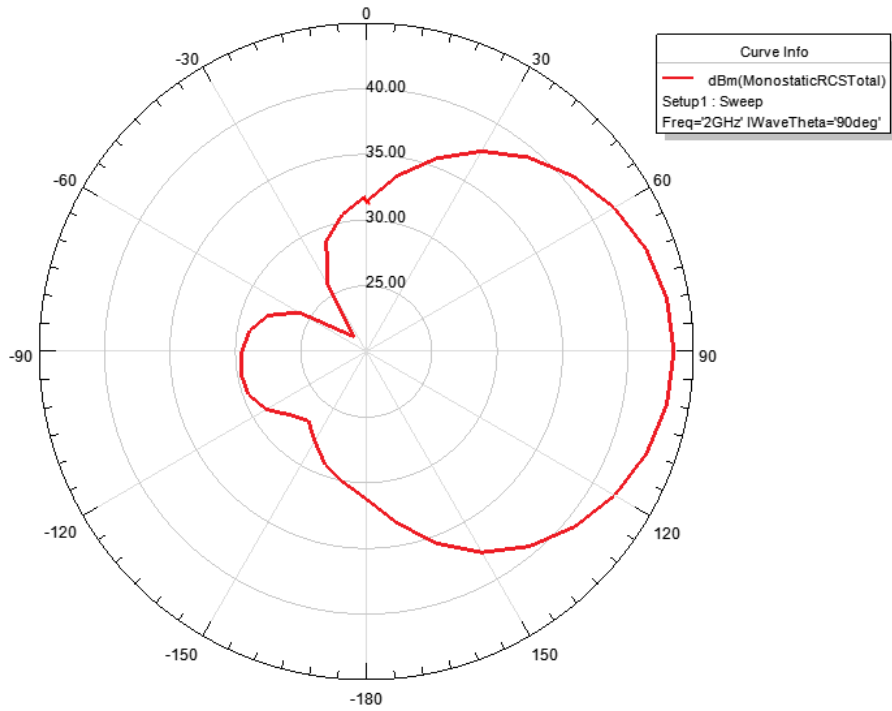
Antenin analizi yapıldıktan sonra Şekil 3.17'deki MagJ sonuçlarına bakıldığında iki metalik tabakanın sınırları arasına koyulan portun, toprak ile kesiştiği bölgelerde akı yoğunluğu tespit edilmiştir. Ardından mikroşerit antene sarılmış silindirin radar kesit alanı sonuçları analiz edilmiştir. Analizler 1,2,3 ve 4 GHz frekansları için gerçekleştirilmiştir.

1 GHz için mikroşerit antenli silindirin analiz sonucu,



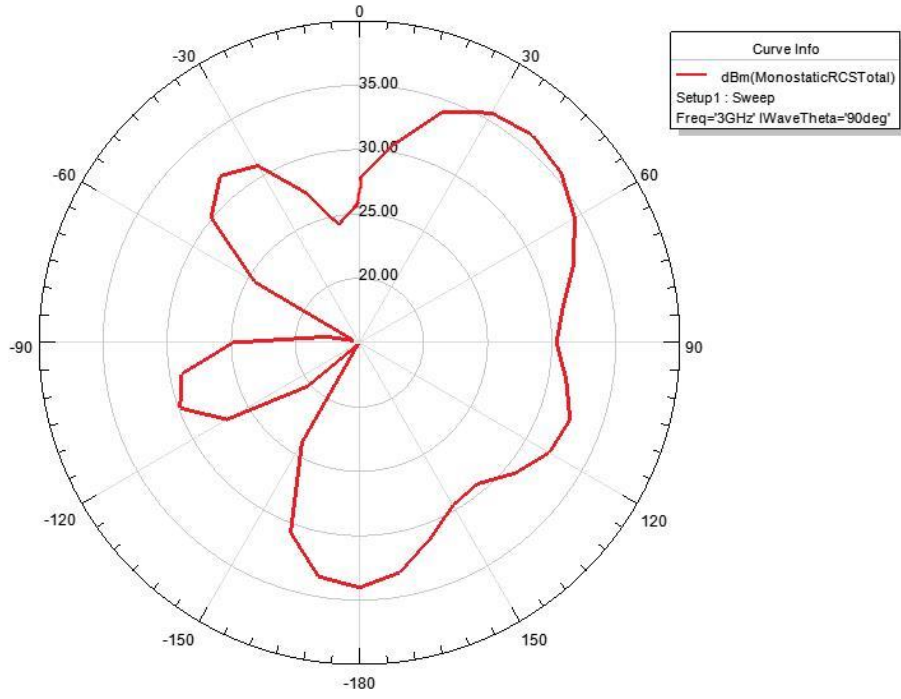
Şekil 3.18 1 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu

2 GHz için analiz sonucu,



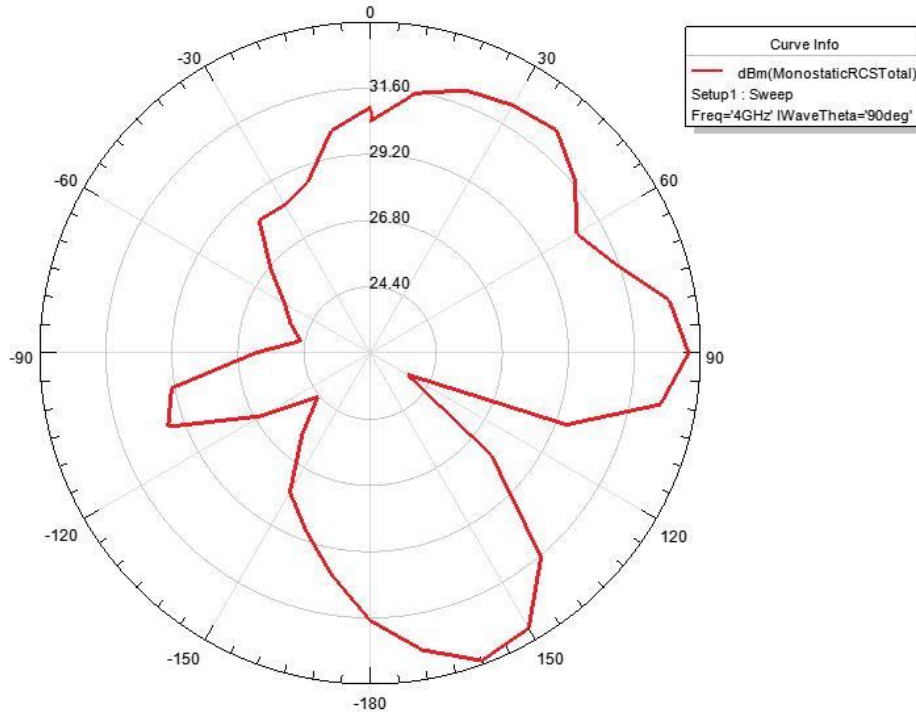
Şekil 3.19 2 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu

3 GHz için analiz sonucu,



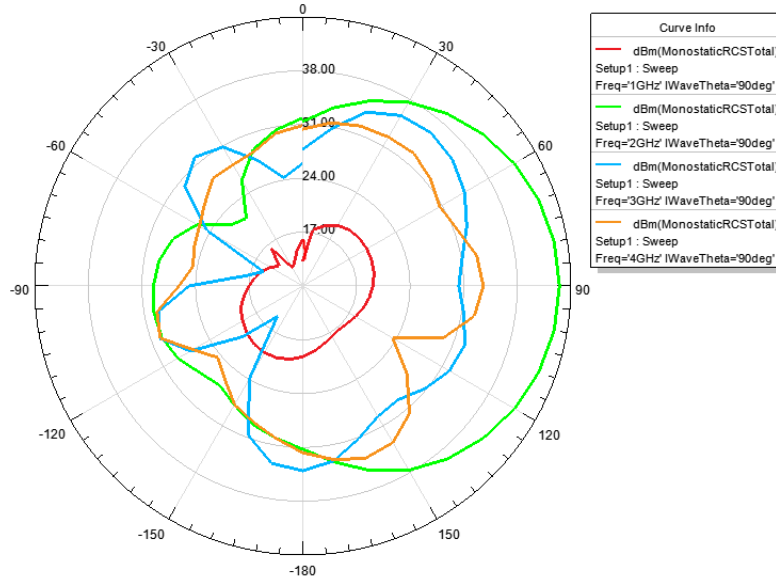
Şekil 3.20 3 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu

4 GHz için analiz sonucu,



Şekil 3.21 4 GHz’de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu

1,2,3 ve 4 GHz frekansları için analiz sonuçlarının tek bir grafikte gösterimi Şekil 3.22'deki gibidir.



Şekil 3.22 1,2,3 ve 4GHz'de mikroşerit antenli silindir analiz sonucu

Analiz sonuçlarına göre 1 GHz seviyesinde 19 *dBm*, 2 GHz seviyesinde 40 *dBm*, 3 GHz seviyesinde 33 *dBm*, 4 GHz seviyesinde 30 *dBm* değerleri görülmüştür. Kullanılan mikroşerit antenin merkez frekansı 2 GHz olduğu için en belirgin artış 2 GHz seviyesinde görülmüştür.

3.2. Baskı Dipol Anten

Dipol anten, radyo frekansı enerjisi iletmek veya almak için merkez beslemeli sürücü elemanına sahip bir antendir. Fiziksel açıdan bakıldığında, bu tip anten pratikteki en basit antendir. Merkezde kesintiye uğrayan bakır gibi iletken metalden yapılmış düz bir elektrik iletkeninden oluşur ve bu nedenle iki kutup oluşturur. Dipol anten, elektrik yüklerinin titreşimine dayanan bir tür radyo antenidir. İki eşit ve zıt yük uçlu bir çubuktan oluşur ve bu uçlar arasındaki mesafe çubuğun boyutunu belirler. Dipol antenler, elektromanyetik dalgaların en iyi şekilde yarılmalarını sağlamak için belirli bir boyutta yapılmıştır ve özellikle FM radyo yayınları için yaygın olarak kullanılır. Dipol antenler, radyo alıcısı veya vericisine bağlanır ve elektrik sinyallerini alarak veya yayarak, bu sinyalleri kablosuz olarak iletebilirler.[35]

Baskılı dipol anten, baskılı devre kartı teknolojisi kullanılarak üretilen bir anten türüdür. Baskılı dipol antenler, düşük profilleri, hafiflikleri ve imalat kolaylıkları nedeniyle

kablosuz iletişim sistemleri ve radyo frekansı tanımlama sistemleri gibi uygulamalarda popülerdir. İletken elemanların boyutuna ve şekline bağlı olarak geniş bir frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanabilirler ve yönlü radyasyon modellerine sahip olabilirler.

Dipol anten, RF anteninin en önemli yapılarından biridir. Dipol anten tek başına veya bir dizinin parçası olarak kullanılabilir. Dipol anten sadece kendi başına kullanılmaz, aynı zamanda televizyon antenleri ve daha pek çok yerde görülen Yagi yönlü anten gibi diğer antenlerin 'yönlendirilen' ögesini oluşturur. Ayrıca parabolik yansıtıcı anten için sürücü elemanı olarak kullanılır ve diğer birçok antenin sisteminde de kullanılır.[36]

Temel bir anten, iki ayrı iletkenin oluşan bir ışıma elemanıdır. Bu iki iletken genellikle aynı eksen üzerinde yer alır ve çift kutuplu antenler genellikle merkezde bölünmüştür. Anten, vericiden gelen güçle yayılabilir veya anten tarafından alınan güç bir alıcıya bağlanabilir. Genellikle alıcı veya verici, gücün dipol antene bir ara besleyici kullanarak bir noktadan diğerine aktarılmasını sağlar.

Elemanların yayılma uzunluğu, dipol antenin birçok özelliğini belirleyen bir faktördür. Bu özellikler, antenin besleme empedansı, merkezi çalışma frekansı ve rezonans durumudur. Bu nedenle, dipol uzunluğu dipol anten için önemli bir parametredir.

Dipol antenlerin en yaygın türü yarım dalga dipoldür. Dipol anten uzunluğunun elektriksel olarak yarım dalga boyuna eşit olduğu için "yarım dalga dipol" olarak adlandırılır. Ancak, birçok farklı dipol anten türü mevcuttur. Dipol antenin farklı türleri veya varyasyonları, birçok farklı uygulama için kullanılabilir bu nedenle dipol antenlerin çok esnek ve kullanışlı olduğu görülmektedir. En yaygın kullanılan dipol anten türü, rezonans noktasında elektriksel yarım dalga boyuna sahip olan "yarım dalga dipol" antendir. Anten elektriksel yarım dalga boyu, telin etkisi nedeniyle boş uzaydaki yarım dalga boyundan biraz daha kısadır. Yarım dalga dipol anten genellikle merkezden beslenir ve düşük empedanslı bir besleme noktası kullanılır, bu da yönetimi kolaylaştırır. Anten dengeli olduğundan, toprağa bağlı herhangi bir tarafı olmadığı için dengeli bir besleyici kullanılmalıdır veya dengesiz bir besleyici kullanılıyorsa, dengeliden dengesize bir transformatör kullanılmalıdır.

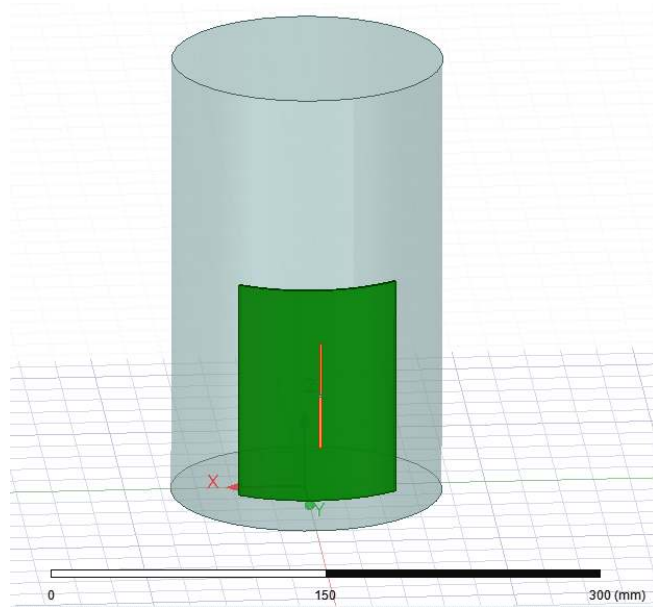
Bir antenin önemli bir özelliği besleme empedansıdır ve bu durum dipol anten için geçerlidir. Dipol antenin ilk dikkat edilmesi gereken özelliği, dengeli bir anten olmasıdır, yani her iki tarafı veya yanları toprağa bağlı değildir. Bu nedenle, dengeli bir besleme sistemi kullanarak beslenmesi gereklidir. Dipolün standart besleme empedansı genellikle 73Ω olarak kabul edilir, ancak empedans, yerden yükseklik, tel kalınlığı ve diğer faktörler

nedeniyle çeşitli değerlerde olabilir. Bu nedenle, doğru empedanslı bir besleme sistemi kullanarak dipolü beslemek, en yüksek güç transferini sağlamak için önemlidir ve bu nedenle besleme empedansını anlamak gereklidir.

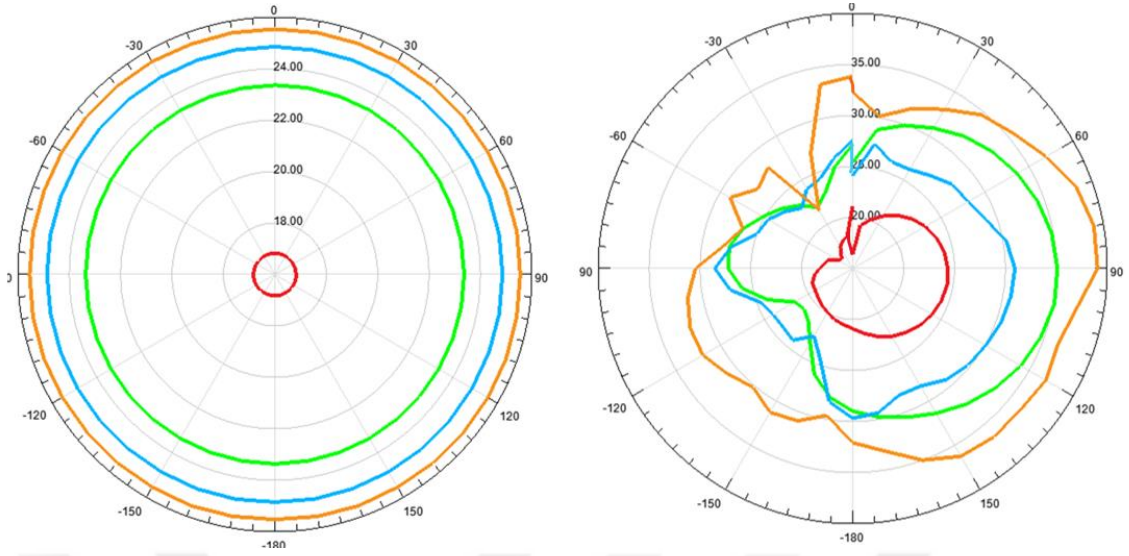
Parabolik reflektörlü antenler, reflektörün anteni gerekli yöne yönlendirmesi için anteni yaymak üzere bir çeşit sürücü elemana ihtiyaç duyar. Bu tür antenler genellikle uydu iletişimi, radyo astronomisi ve diğer çeşitli radyo iletişim bağlantıları için kullanılır. Ayrıca uydu televizyonu alımı için de parabolik reflektör antenler kullanılır. Dipol anten, radyo iletimi ve alımı için yaygın bir RF anten biçimidir ve diğer birçok RF anten türünün temel ögesi olarak da kullanılır. Bu nedenle, dipol anten RF antenlerinin en önemli türlerinden biridir.

Bir dipolün uzunluğu, çalışma frekansını belirlemek için ana husustur. Genellikle dipoller, çalışma frekanslarında bir yarım dalga boyu oluşturacak şekilde tasarlanır. Sonuç olarak, bir çift kutuplu antenin uzunluğunun hesaplanması, HF, VHF veya UHF vb., yayın alımı, iletimi veya noktadan noktaya gibi iki yönlü radyo iletişimleri için herhangi birini tasarlamamanın ve kurmanın temel bir unsurudur.

Bu tezde kullanılan baskılı dipol antenin uzunluğu 6,09 cm ve genişliği 0,15 cm'dir. Ayrıca, alt tabaka yüksekliği 0,1575 cm, alt tabaka boyutu (X) 9,1 cm ve alt tabaka boyutu (Y) 12,2 cm'dir. Baskılı bir dipol anten bir silindire kaplanır ve 1,2,3 ve 4 GHz için analiz edilir.



Şekil 3.23 Baskı dipol antenin ANSYS HFSS programında görünümü



Şekil 3.24 Baskı dipol antenin 1,2,3 ve 4 GHz'de RKA sonucu

Şekil 3.24'te sol tarafta silindirin anten olmadan açığa çıkan RKA sonucu görülürken, sağ tarafta baskı dipol anten eklendikten sonraki analiz sonuçlarının 1,2,3 ve 4 GHz'lik frekanslardaki sonuçları görülmektedir.

2 GHz frekansındaki radar kesit alanı, Şekil 3.24'te maksimum 43 dBm olarak tespit edilmiştir. Antenin maksimum kazancı 2.53 iken füze platformundaki radar kesit alanı hesaplaması,

$$\sigma = \frac{\lambda^2 G^2}{\pi} = \frac{(0.5)^2 6.4}{3.14} = 0.5 \text{ dBm}^2 \quad (46)$$

Baskılı dipol antenlerin imalatındaki zorluklardan biri, özellikle yüksek frekanslarda çalışan küçük ölçekli antenler için baskı sürecinde yüksek hassasiyet ve doğruluk elde etmektir. Antenin performansını, substrat malzemenin kalınlığı ve dielektrik sabiti de etkilemektedir. Baskılı dipol antenlerin bir dezavantajı, substrat ve besleme hattındaki kayıpların varlığı nedeniyle verimliliklerinin yama antenler gibi diğer anten türlerinden daha düşük olabilmesidir. Yüksek verimlilik ve performans elde etmek için anten geometrisinin ve besleme yapısının dikkatli tasarımı ve optimizasyonu gereklidir.

3.3. Papyon Anten

Papyon anten, birbirine paralel yerleştirilmiş ve bir iletim hattı ile beslenen, papyon veya kelebek şeklinde iki üçgen metal iletkenlerden oluşan bir anten türüdür. Daha iyi bir empedans eşleşmesi elde etmek ve antenin bant genişliğini genişletmek için iki iletken genellikle besleme noktasına doğru inceler.

Papyon anten, geniş bantlı bir antendir ve genellikle televizyon ve radyo yayıncılığı gibi uygulamaların yanı sıra radar ve iletişim sistemlerinde de kullanılır. Anten yatay düzlemde geniş, dikey düzlemde dar bir yayılım düzenine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, antenler genellikle sinyalleri 60 derecelik bir açıdan alır, bu da çeşitli kaynaklardan gelen sinyalleri almak için mükemmel bir yapıdır.

Papyon antenin bir avantajı, yapımının kolay olması ve basit ve ucuz malzemeler kullanılarak yapılabilmesidir. Ayrıca düşük profilli olarak tasarlanabilir, bu da onu mobil ve kompakt uygulamalarda kullanıma uygun hale getirir. Ek olarak, papyon anten, uzun mesafelerde zayıf sinyalleri almasına izin veren nispeten yüksek bir kazançla sahiptir.

Papyon anten, bir tür UHF dipol antenidir. Bu antenler, log periyodik antenlere benzeyebilir, ancak Log periyodik antenleri olarak kabul edilmezler.

Geniş bant antenlere olan talebin artmasıyla birlikte anten araştırmacıları, antenlerin bant genişliğini artırmak için çalışmalara başlamıştır. İlk başta konsept, bant genişliğini artırmak için dipol antenin yarıçapını artırmaktı, ancak bu bant genişliğini iyileştirmek ve geniş bantlı anten gereksinimini karşılamak için yeterli değildi. İletkenler bikonik bir yapı oluşturacak şekilde genişleyecek şekilde tasarlanırsa, bu kavram bant genişliğinin daha da iyileştirilmesi için genişletilebilir. Böylece, sabit tel çapı, daha geniş bir bant genişliği elde etmeye yardımcı olan, konik yüzeyin sabit bir açısına sahip yumuşak bir şekilde değişen bir çap ile değiştirilebilir.

Papyon antende, dipol antenin iki elemanı yerine, iki sonsuz konik iletken yüzey olarak kullanılır ve besleme noktasında sonlu bir boşluk bırakılır. Bu anten yapısı, düzgün bir şekilde sivrilmiş bir iletim hattına benzer ve sonsuzdur. Besleme noktasında zamanla değişen bir voltaj uygulandığında, akımlar bikonik elemanların yüzeyi boyunca besleme noktasından radyal olarak dışarı akar. Bu akımlar manyetik bir alan oluşturur ve Enine Elektromanyetik Alan (TEM) iletim hattı modunda, elektrik alan bu manyetik alana dik olarak oluşur.

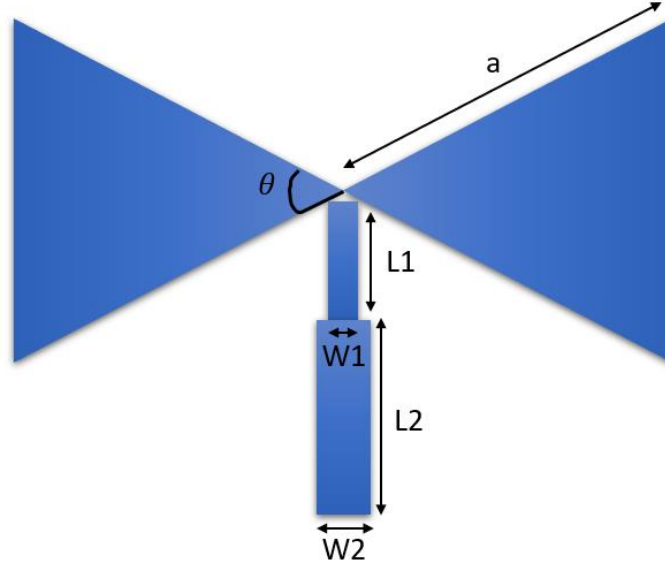
TEM dalgaları için, Helmholtz denklemleri küresel koordinat sistemi kullanılarak, radyal yönde içe ve dışa doğru hareket eden elektromanyetik dalgaların toplamı olarak ifade edilir. Bikonik yüzeyin sonsuz olması, radyal yönde herhangi bir kesinti olmadığı anlamına gelir, bu da yansıyan dalgaların olmayacağı ve böylece geniş bant özelliğinin elde edileceği anlamına gelir. Daha sonra, sonlu çift konik anteni oluşturan sonsuz çift konilerin iki konisi sonlandırılarak pratik olarak uygulanabilir bir çift konik anten tasarlanmıştır. Yalnızca hareket eden dalgaın mevcut olduğu sonsuz çift konik antenden farklı olarak, sonlu çift konik antenlerde, antenin ucundaki süreksizlik nedeniyle yansıyan dalgalar vardır.

Sonlu bikonik antenin ucundaki süreksizlik, yüksek dereceli modları oluşturarak antenin giriş empedansında reaktif bir bileşen indükler. Bu da duran dalga oranını artırır. H konik açısı arttıkça, giriş empedansının reaktif kısmı daha geniş bir bant genişliğinde en aza indirilebilir ve giriş empedansının gerçek kısmı frekanstan bağımsız hale gelebilir.

Discon anteni, bikonik antenin bir gelişmesidir ve konilerden birinin yerini bir disk ile değiştirir. Diskon antenin tasarımı, disk çapının en düşük frekansın çeyrek dalga boyuna eşit olacak şekilde ayarlanması gerektiği için biraz farklıdır. Antenin giriş empedansı, koni açısı, eğim uzunluğu ve disk yarıçapı gibi geometrik değişkenlere bağlıdır. Daha uzun dalga boylarında, anten yapısı küçük olduğu için basit bir dipol anten gibi davranırken, daha yüksek frekanslarda sonsuz zemin düzlemine sahip bir anten gibi davranır. Discon anten, geniş bant kapsama alanı ve sade tasarım yapısı nedeniyle askeri, ticari ve radyo tarayıcı uygulamalarında tercih edilen bir anten türüdür.

Günümüzdeki cihazlarda, güvenilir performans gösteren düzlemsel ve hafif antenlere olan ilgi artmaktadır. Papyon anten, sonlu bikonik antenin düzlemsel bir versiyonudur ve bir substrat üzerine kolayca basılabilir.[37]

Papyonun konik şekli nedeniyle frekans arttıkça voltaj duran dalga oranı azalmaz ve bu antenin bant genişliğinin fiyonkun açısına bağlı olmasının nedeni budur. Baskı dipol antenlerle karşılaştırıldığında papyon antenler daha geniş bant genişliği performansı gösterir.Şekil 3.25'te, bir papyonlu mikroşerit antenin boyutunu göstermektedir; burada a , papyonlu şeridin yan uzunluğudur, θ , eşkenar üçgenin açısıdır, $L1$, $L2$. $W1$ ve $W2$, eşleşen ağın boyutlarıdır.



Şekil 3.25 Papyon anten yapısı

Papyon antenin boyutlarını elde etmek için kullanılan formül yapısı,

$$f_r = \frac{ck_{mn}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \quad (47)$$

$$f_r = \frac{2c\sqrt{m^2+mn+n^2}}{3\alpha\sqrt{\epsilon_r}} \quad (48)$$

Bu formülde f_r rezonans frekansı, k_{mn} rezonans modu, m ve n mod numaraları, c boş uzayda ışığın hızı, α antenin kenar uzunluğudur.

Mn modu için rezonans frekansı hesabı,

$$f_{mn} = f_{10}\sqrt{m^2 + mn + n^2} \quad (49)$$

Boş uzayda dalga boyu hesabı,

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (50)$$

Antenin dalga boyu hesabı,

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (51)$$

Dominant modda rezonans frekansı hesabı,

$$f_{10} = \frac{2c}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (52)$$

Kenar uzunluk hesabı,

$$\alpha = \frac{2c}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (53)$$

Kenar uzunluğunun etkili değeri,

$$\alpha_{eff} = \alpha + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (54)$$

Etkili dielektrik sabiti hesabı,

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{4\sqrt{1 + \frac{12h}{\alpha}}} \quad (55)$$

Bant genişliği hesabı,

$$b = 0.33 \times f_r \quad (56)$$

Papyon anten genişlik hesabı,

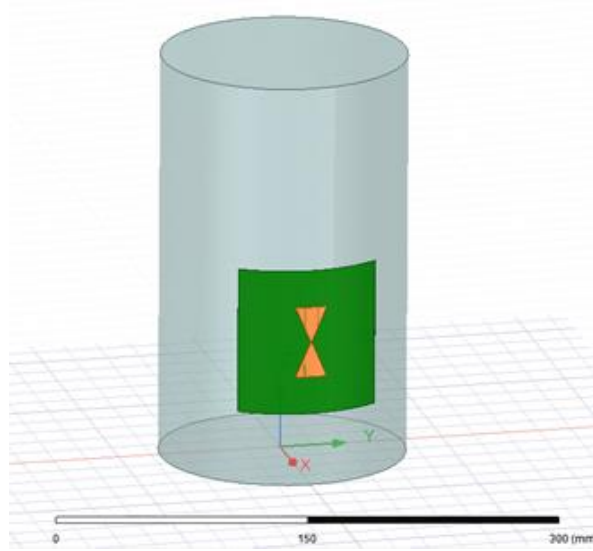
$$W = 0.375 \times \lambda \times 1000 \text{ mm} \quad (57)$$

Papyon anten yüksekliği,

$$h = 0.25 \times \lambda \quad (58)$$

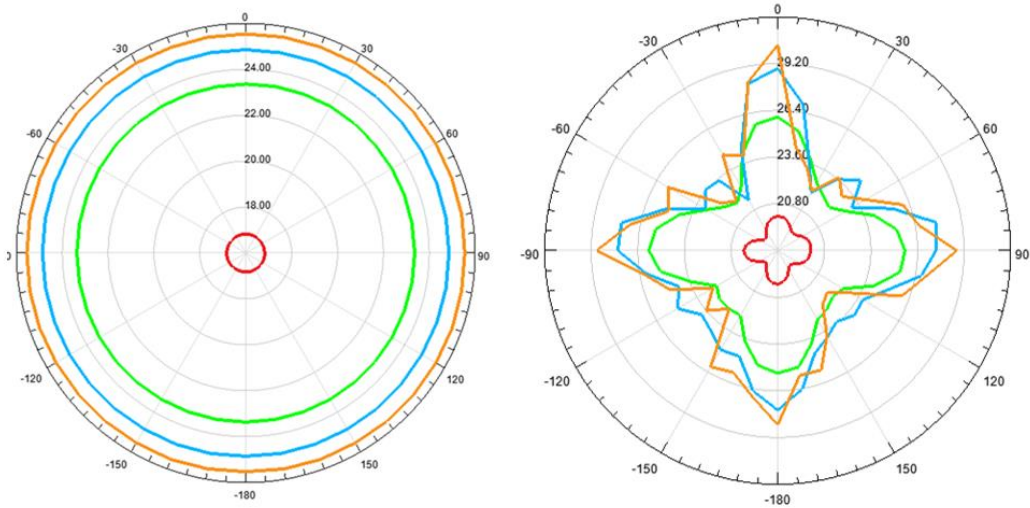
Papyon anteni, iki metal parça arasında belirli bir açıyla belirlenmiş bir antenden oluşur. Bu antenin pozitif ve negatif terminallerinin antene bağlandığı yer anten beslemesi olarak adlandırılır ve yapımı ucuz ve kolaydır. Bir papyon anten, anten elemanı olarak düz bir çubuk yerine üçgen elemanlar kullanır. Adı, antenin her iki yanında çıkıntı yapan ve papyonu andıran üçgen öğelerden türemiştir.[38]

Papyon anteni bir UHF dipol antenidir. Papyon antenler, günlük periyodik antenlere benzer. Bu fiyonklu antenin iç genişliği 0.11 cm, dış genişliği 1.94 cm, kol uzunluğu 2.15 cm ve port açıklığı genişliği 0.11 cm'dir. Ayrıca alt tabaka yüksekliği 0,1575 cm ve alt tabaka (X) ve (Y) 9 cm'dir.Şekil 3.26'da Papyon anten öncelikle bir silindirin yüzeyine sarılmıştır ve analiz bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.26 Papyon antenin silindir üzerine uygulanmış hali

Analiz sonuçları silindirin antensiz hali ve silindirin antene sarılmış hali şeklinde 2 kısmı karşılaştırmak için yapılmıştır. Şekil 3.27’de solda görülen kısım antensiz boş silindirin radar kesit alanını gösterirken sağda gösterilen kısım papyon anten ile birlikte silindirin radar kesit alanını göstermektedir. Antenin kelebek şeklinden dolayı radar kesit alanına etkisi 4 yönde saçılmayla gerçekleşmiştir. Papyon anten radar kesit alanı analiz sonuçları Şekil 3.27’de maksimum 30 dBm olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.27 Papyon antenin 1,2,3 ve 4 GHz’de RCA sonucu

Genel olarak, papyon anten, geniş bant performansı, basitliği ve düşük profili nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan popüler ve çok yönlü bir anten tasarımıdır. Papyon anteninin bir sınırlaması, sınırlı yönlülüğe sahip olması ve yüksek kazançlı veya yönlü uygulamalar için pek uygun olmamasıdır. Ek olarak, fiyonklu anten, performansını etkileyebilecek yakınındaki nesnelerden gelen girişime duyarlı olabilir.

Bu 3 antenin sonuçlarını phi derecelerine göre karşılaştırdığımızda Tablo 3.3'te Mikroşerit anten ile yapılan analizlerin diğerlerinden daha çok radar kesit alanını arttırdığı görülmektedir.

Tablo 3.3 3 farklı anten modelinin phi derecelerine göre RKA değerleri

IWavePhi (Deg)	Mikroşerit Anten (2 GHz)	Baskı Dipol Anten (2 GHz)	Papyon Anten (2 GHz)
0	31.4	25.36	26.01
90	43.5	35.11	25.65
180	31.24	28.97	25.35
270	29.5	27.22	25.74
360	31.85	27.14	26.01

4. FAZ DİZİ ANTENLER

Faz dizili anten, anten hüzmesinin yönünü elektronik olarak yönlendirmek için bir modelde düzenlenmiş çok sayıda bireysel yayılım elemanı kullanan bir anten sistemi türüdür. Bu elemanlar aktif (güçle çalışan) veya pasif (güçsüz) olabilir ve her eleman, elemana gönderilen sinyalin fazını ayarlayabilen bir faz kaydırıcıya sahiptir. Anten ışını, sinyallerin fazı ayarlanarak, anteni fiziksel olarak hareket ettirmeden belirli bir yöne yönlendirilebilir.

Faz kaydırıcılar, istenen ışın modelini elde etmek veya hareketli bir hedefi izlemek için her bir elemanın fazını ayarlayabilen bir bilgisayar veya başka bir kontrol sistemi tarafından kontrol edilebilir. Bu sistem, radar, uydu iletişimi ve kablosuz iletişim sistemleri gibi uygulamalarda kullanılabilen elektronik ışını yönlendirmeye yarar.

Faz dizisi anten, bir dizi anten elemanının elektronik olarak kontrol edilen bir şekilde faz ve genliğinin ayarlanması ile oluşturulan bir anten türüdür. Bu elemanlar, anten yüzeyinde bir dizi şeklinde yerleştirilir ve birbirlerine belirli bir uzaklıkta ve düzenli bir aralıkta yerleştirilirler. Faz dizisi antenler, birçok uygulamada kullanılan yüksek yönlü antenlerdir.

Ayrıca, mekanik tarama ile karşılaşılan maliyet ve hız sorunlarını aşarak elektronik tarama özelliği sayesinde yüksek çözünürlüklü görüntüler ve hassas hedefleme sağlayabilirler. Yayılan elemanın fazını elektronik olarak değiştirerek ışının yönünü değiştirebilir, böylece hareketli parçası olmayan hareketli bir model üretilebilmektedir. Faz dizi antenler, minimum yan lob seviyeleri ve dar ışın genişlikleri elde etmeyi başararak, ışın desenini elektronik olarak yüksek etkinlikle yönlendirme yetenekleriyle bilinir. [39]

Faz dizi antenlerin en önemli avantajlarından biri, mekanik harekete ihtiyaç duymadan hüzmeleri farklı yönlerde oluşturabilmeleri ve yönlendirebilmeleridir. Bu, onları askeri veya havacılık uygulamaları gibi hızlı tarama veya izleme gerektiren uygulamalar için çok uygun hale getirir. Ek olarak, faz dizi antenler, artan kazanç, azaltılmış parazit ve iyileştirilmiş sinyal-gürültü oranı gibi geleneksel tek elemanlı antenlere göre gelişmiş performans sunabilir.

Bununla birlikte, faz dizi antenler, geleneksel antenlere kıyasla tasarımı ve uygulaması daha karmaşık, pahalı, daha fazla güç ve işlem kaynağı gerektirebilir. Ayrıca, öğelerin uygun şekilde hizalanmasını ve aşamalı olmasını sağlamak için hassas kalibrasyon gerektirirler.

Genel olarak, faz dizi antenler, özellikle hızlı ve doğru yön kontrolünün gerekli olduğu durumlarda, çeşitli alanlarda birçok uygulamaya sahip güçlü ve çok yönlü bir teknolojidir.

Anten dizilerinde geri saçılma için uygun bir parametre, saçılma tarama elemanı modelidir. Bu parametre, dizilerden gelen düzlem dalgası tarafından uyarıldığında, bir dizi öğesinden geri saçılan alan yoğunluğunu verir. O halde bu, yayılan alan yoğunluğunu toplam yayılan güçle ilişkilendiren tarama elemanı modelinden farklıdır. Radar kesiti, yeniden yayılan alan yoğunluğunu $4\pi R^2$ faktörü ile gelen alan yoğunluğuyla ilişkilendirmiştir. Yayılan bir dizi durumunda olduğu gibi, saçılan dizinin sonlu boyut ve kenar efektleri ayrılmıştır, böylece saçılan tarama elemanı modeli, eleman tasarımı ve dizi kafesinin etkilerini ilişkilendirir. Daha sonra eleman ve kafes türünde tasarım işlemleri yapmak için kullanılabilir; dizi boyutuna bağlı özellikler, basitçe izotropik dizi faktörü ile çarpılarak dahil edilir. Saçılan tarama elemanı modeli, radar kesit alanı modeli ile ilgilidir. Dizinin bir birim hücresi radar kesit modeli olarak düşünülebilir. Dalga boyu bağımlılığı olmadan yazılan tek yönlü denklem,

$$P_r = \frac{P_t G A_e}{4\pi R^2} \quad (59)$$

P_r ve P_t alınan ve gönderilen güçlerin sembolüdür. R mesafeyi, G ve A_e antenin kazancını göstermektedir. GA_e , ilgilenilen frekans bandı üzerinde sabitse, anten ve eşleşen birim fazının da uygun davranması koşuluyla, sinyal önemli bir dağılım olmadan aktarılır. [40]

Faz dizi antenlerin radar kesit alanı üzerinde etkisi mevcuttur. Faz dizi anten yapısında bulunan antenlerin sayısı arttırılıp veya azaltılarak radar kesit alanı üzerinde değişim yaratılabilir.

4.1. Lineer Diziler

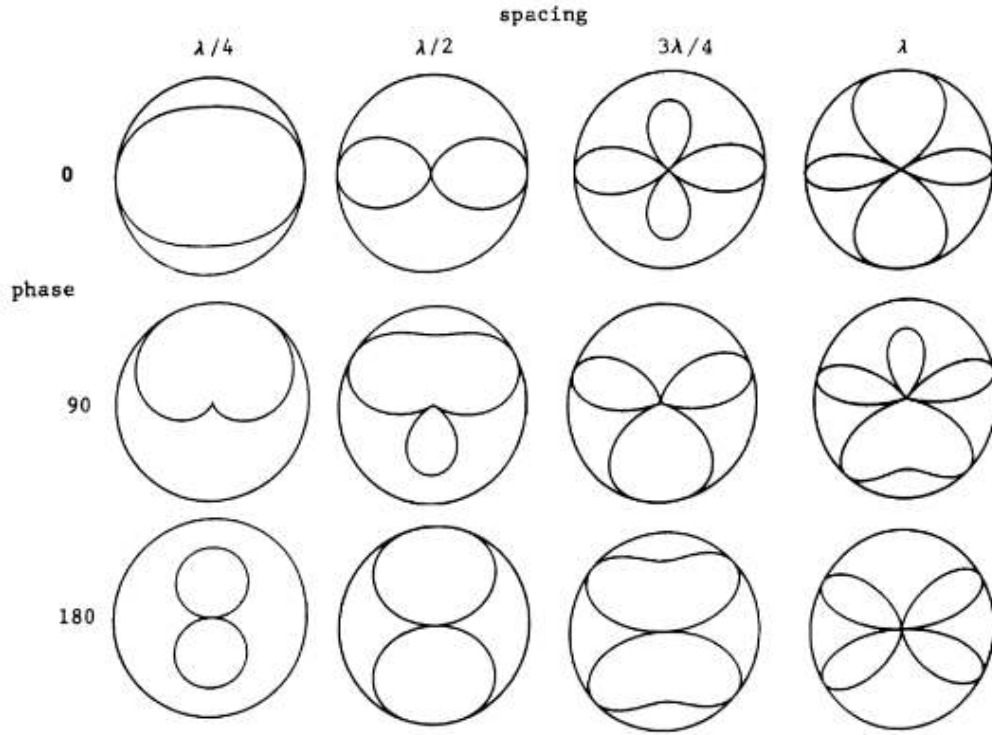
Doğrusal dizi, düz bir çizgide veya doğrusal bir modelde düzenlenmiş birden çok anten elemanından oluşan bir anten dizisi türüdür. Dizideki her eleman, komşu elemanlardan sabit bir mesafede bulunur ve bağımsız olarak sinyal almak veya iletmek için tasarlanmıştır.

Doğrusal diziler, iletişim sistemleri, radar sistemleri ve yön bulma sistemleri gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Doğrusal dizinin tasarımı, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak dar ışın veya geniş ışın gibi belirli radyasyon modellerini elde etmek için optimize edilebilir.

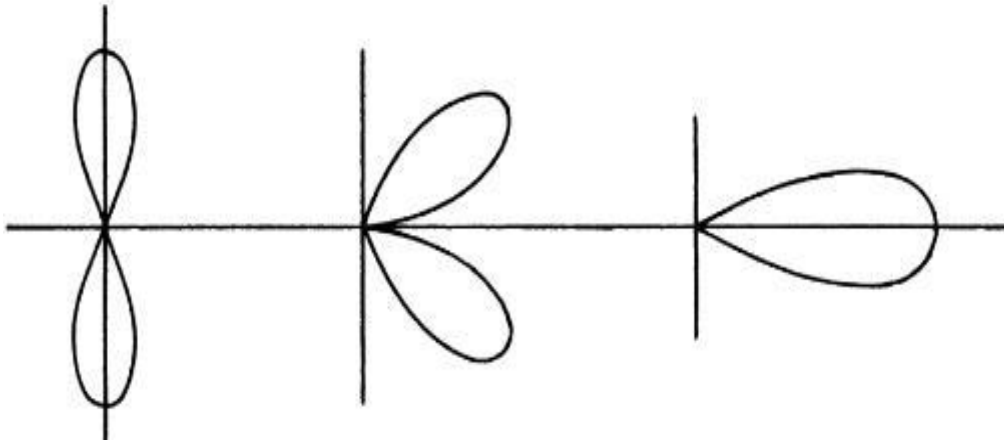
Anten literatüründe yaygın bir notasyon kullanılır, λ dalga boyu, d eleman aralığı, $k = 2\pi/\lambda$ ve u açısal değişkendir. Aynı zamanda $u = \sin \theta - \sin \theta_0$ ve θ_0 tarama açısını gösterir. Çift ve tek sayıda eleman içeren doğrusal bir dizi, merkezde bir koordinat sistemi eksenine sahip olmak için biraz zorluklar yaratabilir. Dizinin koordinat sistemi genellikle bir uçtan başlatılır. Uzak faktörü olarak adlandırılan model,

$$F(u) = \sum A_n \exp [jkd(n-1)u] \quad (60)$$

A_n , sabit kabul edilen bir karışık uyarımı gösterir.



Şekil 4.1 2 elemanlı dizi paterni



Şekil 4.2 Lineer Dizi Hüzmesi

Düzgün bir uyarım için, dizi modeli, denklemdeki üstelin atılabileceği basit bir sonuç haline gelir ve gerçek model üsteli ile çarpılır:

$$F(u) = \exp [j\pi(N - 1)u] \frac{\sin \frac{1}{2}Nkdu}{N \sin \frac{1}{2}kdu} \quad (61)$$

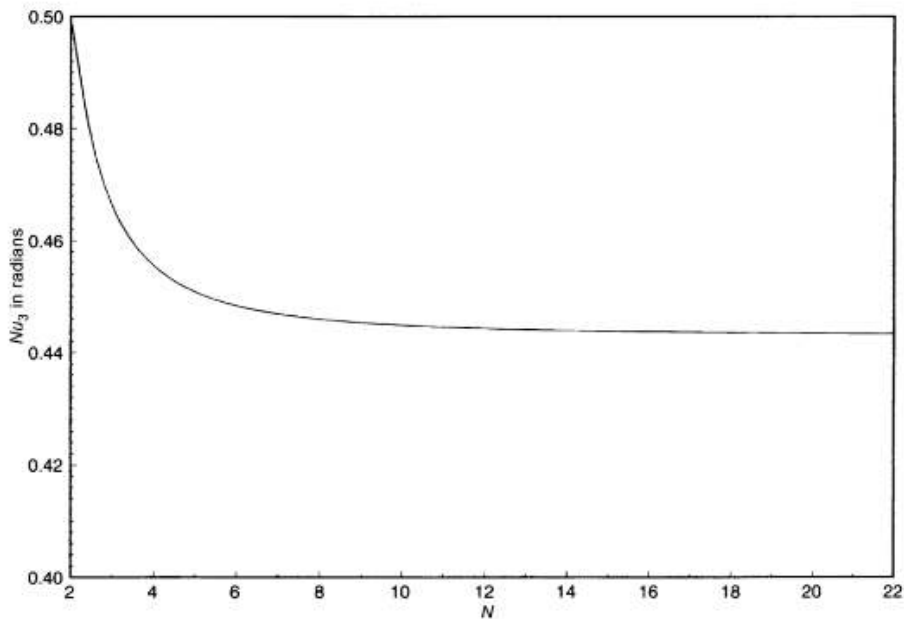
Bu elementler arası faz kayması $kd \sin \theta$ 'dir. Bu faz kayması değiştirilerek, ışın konumu taranabilir. Şekil 4.1'de çeşitli aralıklar ve fazlar tarafından üretilen desenler gösterilmektedir.

Birçok lineer dizi, dar bir ışın üretmek üzere tasarlanmıştır. Şekil 4.2'de, ışının tarama açısı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Işın taranırken, ortadaki çizimde gösterildiği gibi bu disk ışını konik bir ışın oluşturur. 3 dB noktası 90° 'ye geldiğinde ise tek bir hüzmeye oluşur. Bu tarama açısının ötesinde ışının iki tepe noktası vardır ve "ışın genişliği" dışarıdaki 3 dB noktaları kullanıldığında iki katına çıkar. Son olarak, uçtan ışımada bir kalem ışını oluşur; bu nedenle, geniş kenardaki doğrusal bir dizi, bir boyutta yönlülük sağlarken, uçta, iki boyutta yönlülük sağlar. Normal bir dizi modelindeki yarı güç noktaları şu şekilde bulunur:

$$\frac{\sin^2 \frac{1}{2} N k d u_3}{N \sin^2 \frac{1}{2} k d u_3} = \sqrt{0.5} \quad (62)$$

Dizi sayısı $N > 7$ ise, normalize edilmiş hüzmeye fonksiyonu $N u_3 < 0.1$ ve $N = 3$ iken hata oranı %5'tir. Bu yüzden, büyük diziler için yarı güç noktaları basitçe $\frac{1}{2} N k d u_3 = \pm 0.4429$. θ_0 açısında taranan bir ışın için, 3 dB ışın genişliği u_3 'ü şu şekilde verir:

$$Q_3 = \arcsin \left(\sin \theta_0 + 0.4429 \frac{\lambda}{N d} \right) - \arcsin \left(\sin \theta_0 - 0.4429 \frac{\lambda}{N d} \right) \quad (63)$$



Şekil 4.3 Array sayısına göre hüzmeye genişliği

Büyük N dizileri için, Q_3 değeri azalır.

$$Q_3 = \frac{0.8858\lambda}{Nd \cos \theta_0} \quad (64)$$

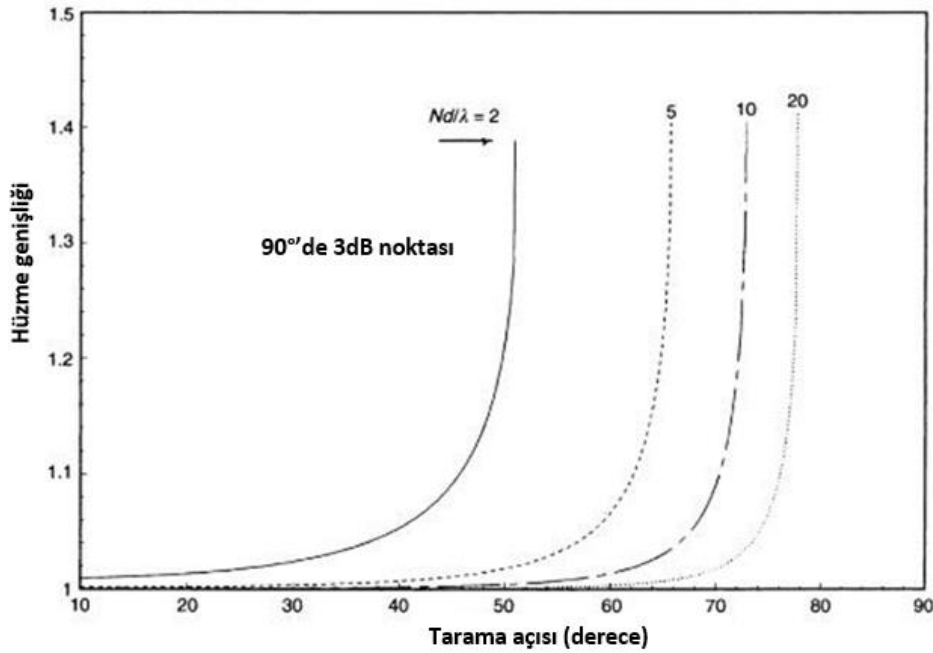
3-dB noktasının 90° 'de olduğu uçtan ışıma yakınındaki hüzme düşüşü, tarama açısı için meydana gelir.

$$Q_0 = \arcsin \left(1 - 0.4429 \frac{\lambda}{Nd} \right) \quad (65)$$

Son uçtan ışımaya yakın genişleyen ışın genişliği, birkaç dizi için şekilde gösterilmiştir. Büyük diziler için, uçtan ışıma genişliği,

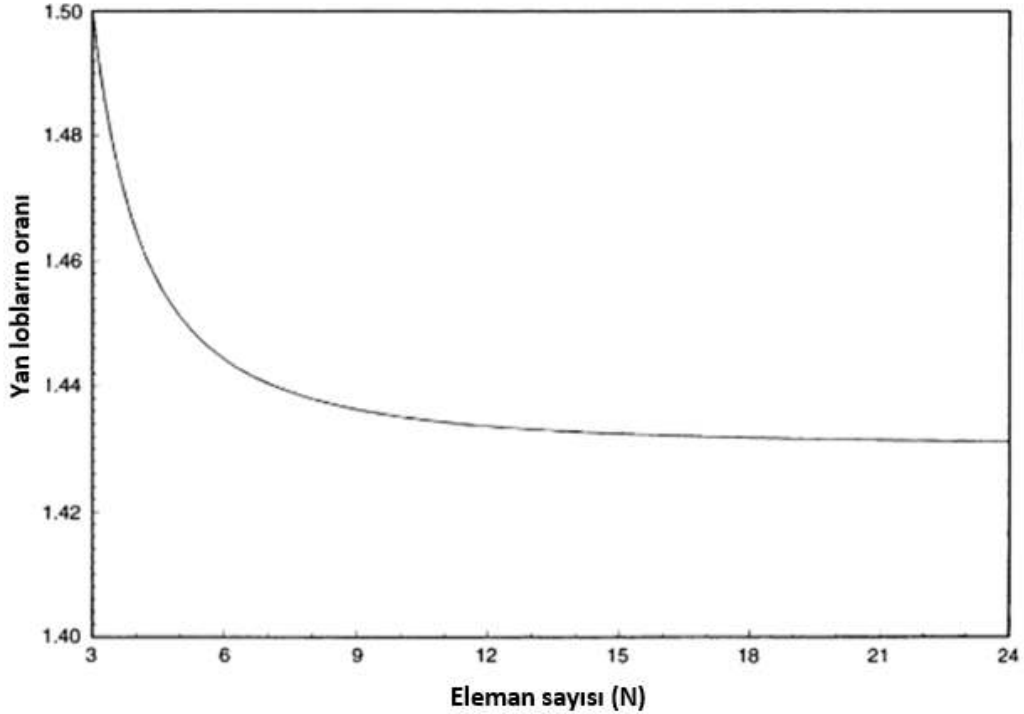
$$Q_3 = 2 \sqrt{\frac{0.8858\lambda}{Nd}} \quad (66)$$

$Nd/\lambda > 4$ için doğruluk oranı %1'den daha iyidir. Uçtan ışıma hüzmesi geniş kenar değerinden $2.14 \sqrt{Nd/\lambda}$ kadar büyüktür. Bu yüzden, uçtan ışıma hüzmesi geniş kenarlı yassı ışımdan daha geniştir.



Şekil 4.4 Tarama açısına karşı hüzme genişliği

Yan lobların oranı için uygun terim, ana hüzme genliğinin birinci yan lobun genliğine oranı olarak açıklanabilir. Büyük dizilerde açığa çıkan yan lob oranı, ana ışın açısından bağımsızdır. Yan lobların oranı dizi sayısına göre değişkenlik göstermektedir.



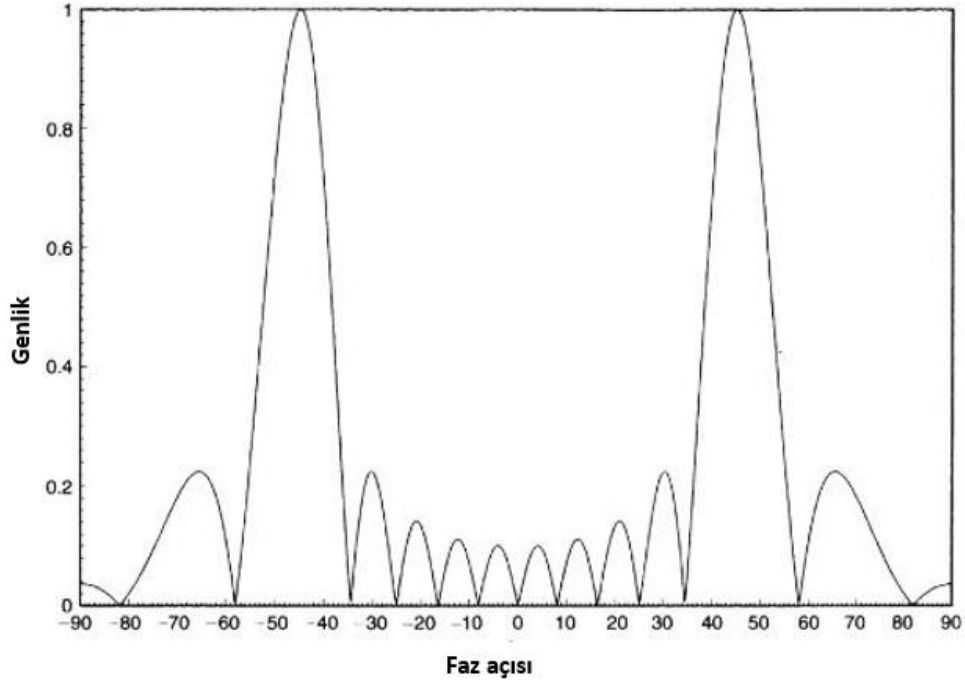
Şekil 4.5 Eleman sayısına göre ilk yan lobların pozisyonu

Bu çalışmada 7 adet faz dizi anten kullanılmıştır. Bu sayı, yan lob oranının minimize olduğu oranı sağlamaktadır.

Bir anten sistemindeki geniş aralıklar, ızgara lobları olarak adlandırılan ekstra yan loblar üretebilirler. Bu durum, geniş aralığın, her bir anten elemanından gelen dalgaların ana ışın açısına ek olarak, ızgara loblarının açısında faz eklenmesine izin vermesinden kaynaklanır. Izgara loblarının formülü,

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{n}{\sin \theta_0 - \sin \theta_{GL}} \quad (67)$$

Yarım dalga aralığında, $+90^\circ$ 'ye taranan bir ışın için -90° 'de ızgaralı bir lob görünür. Bir dalga boyu aralığı, uzun hüzme geniş kenar olduğunda $\pm 90^\circ$ 'de ızgara loblarına izin verir. $N=10$ adette, dizi paterni 0.707λ boşluğunda olduğunda 45° tarandığı zaman -45° 'de görünen ızgara lobları şekildeki gibidir.



Şekil 4.6 Faz açısının genliğe etkisi

Bir dizinin bant genişliği, eleman giriş empedanslarının frekansla değişiminden, ızgara loblarına izin verebilecek dalga boylarında dizi aralığının değişiminden ve elemanın ışın genişliğindeki değişimi vb. dâhil olmak üzere birçok faktörden etkilenir. Bir dizi antenin fazörlerle kontrol edilen sabit faz kayması birimleriyle taranması durumunda, ana ışının konumu frekansla değişir, bu nedenle bant genişliği sınırlaması ortaya çıkar. Ancak, dizi zaman gecikmeli olarak tarandığında, ışının konumu birinci derece frekansa bağımlı değildir. Bununla birlikte, sabit faz kayması kullanılarak ışın hareketi kolayca hesaplanabilir. Işın açısı basitçe $\sin \theta = \left(\frac{f_0}{f}\right) \sin \theta_0$ tarama açısı θ_0 ile ifade edilir.

Büyük dizilerde bant genişliği formülü,

$$BW = \frac{\theta_3}{\sin \theta_0} = \frac{0.866\lambda}{L \sin \theta_0} \quad (68)$$

Normal bir dizi için bant genişliği formülü,

$$BW = \frac{\lambda}{L \sin \theta_0} \quad (69)$$

Hüzme açısı 30° olduğu zaman kullanılacak bant genişliği formülü, $BW = \frac{2\pi}{L}$ olarak hesaplanır.

Doğrusal bir dizinin ana avantajlarından biri, dizideki her bir öğeye beslenen sinyallerin fazını ve genliğini ayarlayarak radyasyon modelini belirli bir yönde yönlendirme yeteneğidir. Bu tekniğe ışın yönlendirme veya hüzmeleme denir ve antenin enerjisini belirli bir hedefe odaklamak veya ortamı farklı yönlerde taramak için kullanılmaktadır.

Genel olarak, doğrusal diziler, yönlü radyasyon modelleri veya sinyallerin işlenmesini gerektiren çeşitli uygulamalarda kullanılan önemli bir anten dizisi türüdür.

4.2.Konformal Diziler

Konformal bir dizi, düzlemsel olmayan veya kavisli bir yüzeye entegre edilmek üzere tasarlanmış bir anten dizisi türüdür.[41] Genellikle düzlemsel veya düz olan geleneksel anten dizilerinin aksine, konformal diziler, üzerine monte edildikleri uçak veya füze gibi nesnenin şekline uyacak şekilde tasarlanabilir. Bu, çevredeki ortamın daha iyi kapsanmasını sağlar ve anten sisteminin boyutunu, ağırlığını ve karmaşıklığını azaltmaya yardımcı olabilir.

Konformal diziler, radar sistemleri, iletişim sistemleri ve elektronik harp sistemleri gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Düzlemsel bir anten dizisinin bir uçağın veya bir füzenin kavisli yüzeylerine monte edilmesinin pratik olmadığı veya imkânsız olduğu havacılık uygulamalarında özellikle kullanılırlar.

Işıma sorunları ve düzlemde meydana gelen dalga kırınımları sebebiyle antenlerin tasarımında konformal yapılar sıkça kullanılmaktadır. Bir antenin, bir uçakta veya daha küçük bir hava platformunda olduğu gibi bazı şekilli yüzeylere geometrik olarak uyması gerektiğinde konformal anten dizileri gerekli olmaktadır. Bunun nedeni, antenin şeklinin aerodinamik olarak optimize edilmiş düzlemsel olmayan bir yüzeye uyum sağlaması gerektiğinde aerodinamik nedenlerle veya radar kesit alanını değiştirmek için ihtiyaç olmasıdır.

Düzlemsel olmayan anten dizilerinin kullanılmasının başka bir nedeni, çok geniş bir görüş alanına sahip olması ve düzlemsel diziler için bilinen $\pm 60^\circ$ görüş alanından daha büyük olmasıdır.

Bir konformal dizi ile bir düzlemsel dizi arasındaki en belirgin fark, geometri ve ızgara kafesi yapısıdır. Düzlemsel durumda, elemanlar genellikle simetrik bir dikdörtgen veya üçgen ızgara şeklinde düzenlenir. Bu nedenle, düzlemsel dizi çoğu uygulamada sonsuz bir dizilim olarak kabul edilir ve bunun için bilinen analiz yöntemleri mevcuttur. Düzlemsel dizinin üretimi de daha basit ve daha ucuzdur. Düzlemsel dizinin, aerodinamik şeklinin

sınırlamalarından dolayı istenilen şekilde oluşturulması zordur. Bu nedenle, çoğu durumda düzlemsel diziler, aerodinamik bir radom gerektirir. Örneğin, bir uçağın burun radarı, düzlemsel bir yapıya sahip olup bir radomla kaplanır. Radom, dizinin etrafını kaplayan bir alana sahiptir ve bu nedenle dizinin çapını sınırlar. Düzlemsel dizilerin, işletme bant genişliği ve maksimum tarama açısı temel sınırlamalara sahiptir. Eğer elemanlar yarım dalga boyundan daha yakın bir mesafeye yerleştirilirse, performansı artırabilir veya azaltabilir. Birbirlerinden daha uzak yerleştirilirlse, maksimum tarama açısı ızgara lobları tarafından sınırlandırılır. Konformal bir dizi, aktif bir yüzey boyunca hareket ettirilebilir, böylece tarama açısı artırılabilir ve ızgara lob olgusu azaltılabilir. Ancak bunun gerçekleştirilmesi, elemanların çalışma sırasında açılıp kapatılabileceği varsayımına dayanır. Aksi takdirde, yanlış yöne bakan elemanlardan ızgara lobları görülebilir. Bir düzlem dalga, eğri bir yüzeye düştüğünde, enerji yüzey boyunca kırılır ve yansıyan enerji odak dışına sahip olur. Bu nedenle, yansıma ile karşılaştırıldığında, eğrisel bir yüzeyden yansıma daha az yoğunluğa sahip olur.[42]

Konformal dizilerin analizi için yayılan elemanlar arasındaki karşılıklı kuplaj bilgisi ve elemanların radyasyon modeli temel bileşenlerdir. Analiz için ilk adım rastgele şekillendirilmiş bir cismin yüzeydeki ve uzaydaki elektromanyetik alanı bulmaktır. Analiz düşük frekans ve yüksek frekans metotlarıyla yapılabilmektedir. Düşük frekans methodunda analiz etmenin yolu değişkenlerin ayrılmasını kullanmak ve çözümü modal veya harmonik seride ifade etmektir. Bu çözüm sadece mükemmel iletken dairesel silindir, eliptik silindir veya küre gibi bazı özel durumlar için elde edilebilir. Bu çalışmada, silindir obje füze gövdesini temsil etmektedir. Geometri karışık olduğu zaman objenin enine kesitinin dönel bir simetrik yüzeyi için, modal bir analiz elde etmek çok zordur. Geometri boyutu arttıkça yakınsama sorunları artmaktadır. Literatüre bakıldığında, yakınsama problemini yüksek frekans teknikleri kullanmadan çözmeye yönelik girişimler bulunmaktadır. En yaygın kullanılan teknik, yavaş yakınsayan harmonik seriyi artık seri açılımına dönüştürmektir. Ayrıca çözüm olarak Momentler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve radyasyon/saçılma problemlerini çözmek için sonlu fark zaman alanı yöntemleri mevcuttur. Yüksek frekanslarda matris büyük hale geldiği için sayısal teknikler pratik olmamaktadır. Yüksek frekans çözümleri için yüzeyin dalga boyunun geniş olması ve düzgün bir eğriliğe sahip olması gereklidir. Bir diğer analiz metodu Fiziksel Optik yöntemidir. Bu yöntem, elektromanyetik dalga saçılımının hesaplanmasında ve reflektör antenlerin çalışmalarında kullanılır. Anten yüzeyinde indüklenen yüzey akım yoğunluğu, yüzeyin doğrudan

aydınlatılan alanlarında bulunan akım yoğunluğu kullanılarak bu teknikle hesaplanır. Diğer bölgelerde akım yoğunluğunun sıfır olduğu varsayılır ve bu akım, radyasyon integralinde kullanılarak saçılan veya yayılan alanlar bulunur. Konformal bir dizinin ana avantajlarından biri, birden fazla anten dizisine ihtiyaç duymadan ortamın 360 derecelik kapsamını sağlama yeteneğidir. Bu durum, anten elemanlarının üzerine monte edildikleri yüzeyin eğriliğine uyan belirli bir düzende düzenlenmesiyle elde edilir. Bunu yaparak, anten elemanları, antenin belirli bir yöndeki sinyalleri algılamasına veya iletmesine izin vererek, belirli bir yönde yayılacak şekilde tasarlanabilir.

Konformal dizilerin bir diğer avantajı da üzerine monte edildikleri platformun yapısına entegre edilebildikleri için anten sisteminin toplam boyutunun ve ağırlığının azaltılmasına yardımcı olabilmeleridir. Bu, ağırlık ve boyutun kritik faktörler olduğu havacılık uygulamalarında özellikle önemli olabilir.

Bu çalışmada, füze gövdesini daha iyi saracağı için konformal mikroşerit anten tercih edilmiştir. Daha sonra bu konformal mikroşerit antenlerden bir dizi anten yapısı uygulanmıştır.

4.3.MALD Platformu üzerine Faz Dizi Anten Yapısının Uygulanması

Tezin bu bölümünde, bir hedefin radar kesit alanı imzasını taklit etmek için MALD platformu üzerinde 2 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin ilki 2 mikroşerit antenle oluşturulan faz dizi anten yapısı uygulanarak gerçekleştirilirken, ikinci analiz 7 mikroşerit antenle oluşturulan faz dizi anten yapısının uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

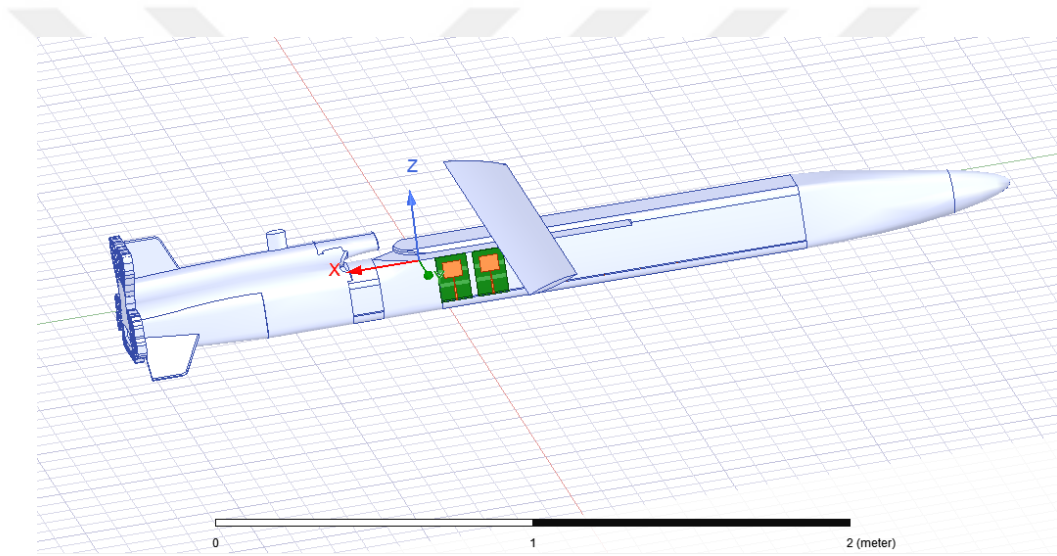
Taklit edilecek radar imzalarının oluşturulması için savaş uçaklarının radar kesit alanı değerlerinin bilinmesi gerekir. Tablo 4.1'e göre şekil, malzeme, nesil vb. nedenleriyle savaş uçaklarında görülen farklı radar kesit alanı oranları görülmektedir.

Tablo 4.1 Savaş uçaklarının RKA değerleri

Hedef	RKA (dBm^2)
B-52 Stratofortress	100-125
C-130 Hercules	80
F-15 Eagle	10-25
F-4 Phantom	6-10
F-16A	5
F-35 Lightning II	0.0015-0.005
F22 Raptor	0.00001

Tabloya bakıldığında B-52 uzun menzilli stratejik bombardıman uçağının radar kesit alanı 100-125 dBm^2 değerlerinde görülürken, F16-A 4.nesil savaş uçağının 5 dBm^2 ve hava üstünlüğü odaklı, düşük radar izi ile yüksek görünmezlik sağlamaya yönelik üretilen savaş uçağı olan F22'nin 0.00001 dBm^2 radar kesit alanı olduğu görülmektedir.

İlk olarak F-16 savaş uçağının radar kesit alanı imzasını taklit etmek için ve düşük radar kesit alanı elde etmek için Şekil 4.7'de oluşturduğumuz mikroşerit anten yapısının 2 adeti kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu antenler konformal antenlere dönüştürülerek MALD platformunun gövdesine uygun hale getirilip yüzeye entegre edilmiştir.



Şekil 4.7 2 adet mikroşerit antenin MALD platformunda uygulanması

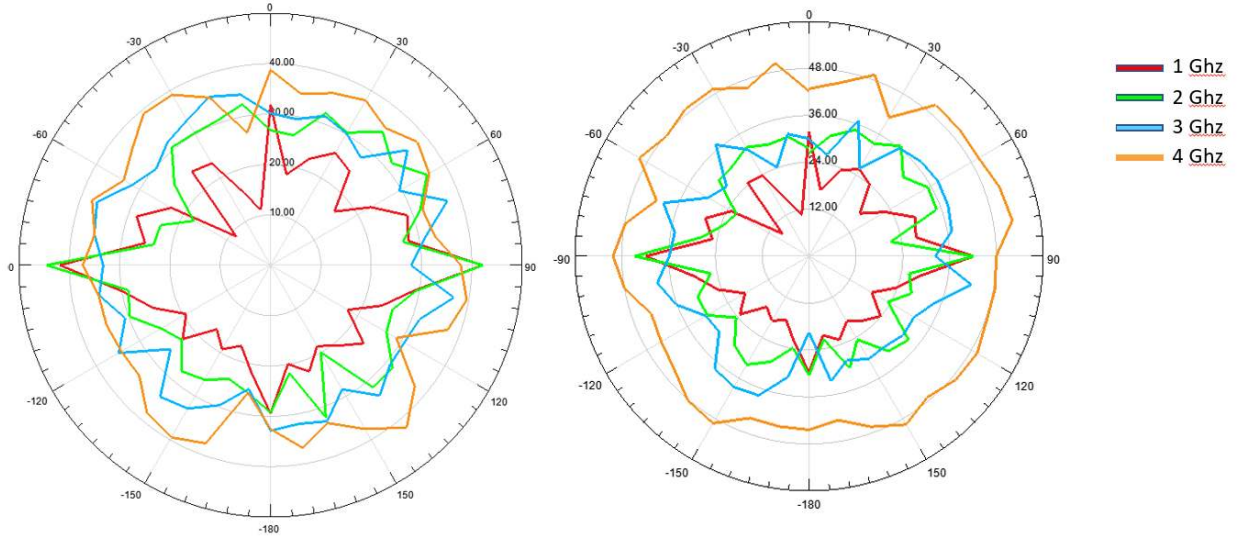
Analiz sonuçlarına göre ortalama 37 dBm radar kesit alanı görülmüştür. 37 dBm'i dBm^2 cinsinden hesaplamak istersek,

$$dBm = dB + 30 \quad (70)$$

$$RKA = 10^{(dB/10)} dBm^2 \quad (71)$$

Sonuç olarak, $RKA = 5 dBm^2$ elde edilir.

2 adet faz dizi mikroşerit antenin konformal olarak füze gövdesine uygulanması sonucunda 1-4 GHz frekansları arasında ortaya çıkan analiz sonuçları Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

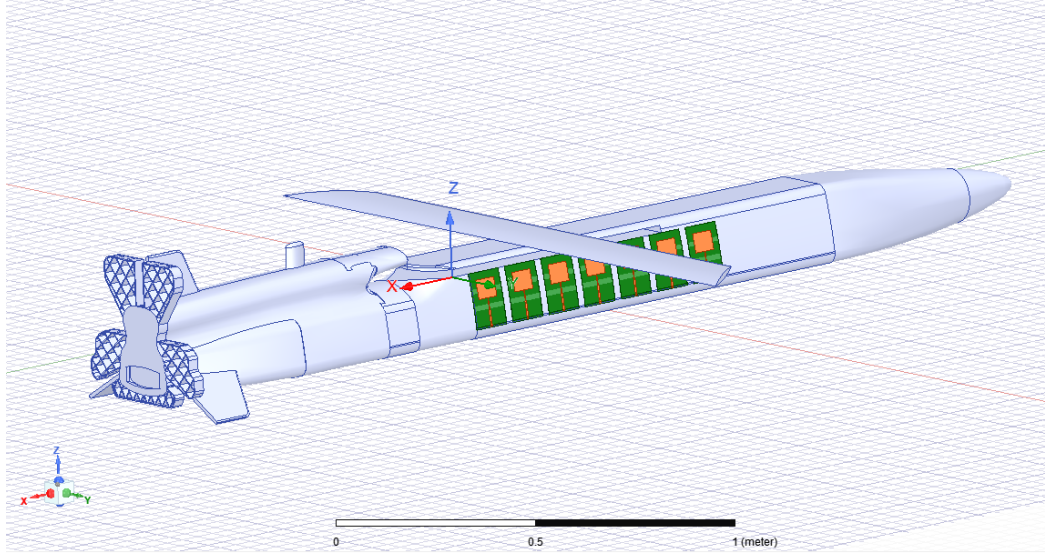


Şekil 4.8 2 adet mikroşerit antenin MALD platformunda RKA analizi

Analiz sonuçlarına göre antensiz füze platformuyla anten uygulanmış füze platformu arasında yaklaşık 10 dBm’lik bir artış görülmüştür.

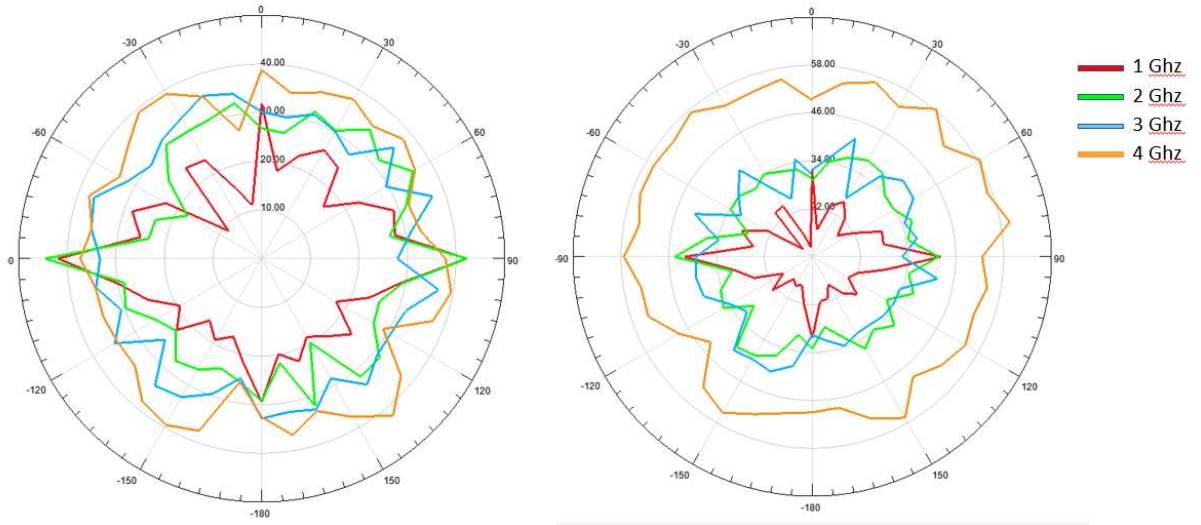
Yanılma platformları hem saldırı hem de savunma amaçlı askeri operasyonlarda kullanılabilir. Saldırı tuzakları, düşmanı yanlış bir hedefe saldırmaya ikna etmek için tasarlanırken, savunma tuzakları, gelen saldırıları amaçlanan hedeften uzaklaştırmak için tasarlanmıştır. Mikroşerit antenler, etkinliklerini artırmak için her iki tuzak platformunda da kullanılabilir.

İkinci analizde B-52 uzun menzilli stratejik bombardıman uçağının radar kesit alanını taklit etmek amacıyla anten sayısı artırılarak radar kesit alanı arttırmak hedeflenmiştir. Bu amaçla faz dizi mikroşerit anten sayısı 7’ye çıkarılmıştır ve konformal olarak füze gövdesine sarılarak analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 7 adet mikroşerit antenin MALD platformunda uygulanması

Analiz 1-4 GHz frekansları arasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 7 adet mikroşerit antenin MALD platformunda RKA analizi

Analiz sonuçlarına göre, füzenin anten eklenmeden önce yapılan radar kesit alanı analiz sonucu modele anten entegre edilince yaklaşık 20 dB’lik bir artış göstermiştir. Mikroşerit antenlerin füze gövdesine uygulanmasıyla elde edilen radar kesit alanı değerlerinin phi derecelerine ve frekanslarına göre sınıflandırılmış hali Tablo 4.2’de görülmektedir.

Tablo 4.2 Yedi adet mikroşerit antenin füzeye uygulanmasıyla elde edilen radar kesit alanı

IWavePhi (Deg)	1 GHz (dBm)	2 GHz (dBm)	3 GHz (dBm)	4 GHz (dBm)
0	31.48	29.01	31.77	49.68
10	16.84	34.20	35.34	54.13
20	23.58	36.42	41.46	56.55
30	25.85	37.89	26.95	53.37
40	22.84	37.37	36.26	58.33
50	18.28	33.77	39.74	53.08
60	21.85	33.60	39.30	58.56
70	28.55	36.68	34.65	58.70
80	28.16	34.38	36.65	60.29
90	42.21	41.71	32.58	52.62
100	28.66	34.56	41.88	54.52
110	21.96	36.98	33.45	53.01
120	20.46	31.56	33.53	54.31
130	24.58	36.86	33.15	52.30
140	21.91	33.83	32.32	49.28
150	18.06	36.57	32.24	56.61
160	21.16	31.19	33.74	53.12
170	21.35	27.88	31.39	48.41
180	30.45	33.01	29.59	48.98
190	22.04	29.88	37.75	49.80
200	17.55	36.42	40.62	51.97
210	18.33	38.58	39.71	55.10
220	17.21	39.50	40.62	52.57
230	23.10	29.14	31.34	43.26
240	18.40	35.69	33.78	48.55
250	25.51	34.41	38.96	53.76
260	29.59	30.46	39.68	53.66
270	41.94	44.43	39.09	57.23
280	25.04	36.78	33.86	54.15
290	28.82	27.07	41.38	55.96
300	23.17	33.61	30.66	55.89
310	13.00	33.77	34.19	55.24
320	24.40	32.14	38.36	57.24
330	24.67	34.04	29.58	53.73
340	15.48	32.72	25.45	53.96
350	12.44	32.21	34.80	55.14
360	31.96	29.67	30.58	49.27

Ortalama 50 dBm radar kesit alanı ortaya çıkmıştır. 50 dBm'i Formül 63 ve 64'e göre dBm^2 cinsinden hesaplamak istersek, $RKA = 100 \text{ dBm}^2$ elde edilir.

İki analiz sonucunda da savaş uçaklarının radar kesit alanlarını taklit etmek için onların sahip olduğu değerlere yaklaşım yapmak adına anten adeti belirlenmiş ve yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Anten modeli ve şekli değiştirilip veya anten sayısı azaltıp artırılıp

taklit etmek istenilen savaş uçaklarına uygun radar kesit alanı elde edilebilir bu sayede savaş senaryosunda düşmanı konum olarak yanıltarak savaş uçağı yerine MALD platformunu tespit etmesi sağlanabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Radar tuzakları, elektronik karşı önlemler ve aldatmada önemli bir rol oynamıştır ve bu alanda son yıllarda çok fazla çalışma ve geliştirme faaliyeti gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen platformlar, savaş uçağının radar izini ve uçuş profilini taklit ederek düşman hava sahasına saldırıyor görüntüsü vermek için kullanılırlar. Bu kapsamda birçok hava platformu geliştirilmiştir bunlar çekici yem platformu, taktik havadan fırlatılan tuzak platformu ve hava konuşlu minyatür yanıltma platformudur. Çekici yem platformu iple fırlatılan bir tuzak olduğu için modellenmesi zor olacağından tercih edilmemiştir. TALD bir uçağın radar imzasını taklit etmek için tasarlanmış küçük, hafif bir tuzak füzesidir. TALD tipik olarak bir savaş uçağından fırlatılır ve düşman radar sistemlerini şaşırtmak ve dikkatini dağıtmak için kullanılır, dikkatlerini asıl uçaktan uzaklaştırır. TALD, hem yerdeki hem de havadaki radar sistemlerini aldatmak için kullanılabilir. MALD ise Minyatür Havadan Fırlatılan Tuzak anlamına gelir. TALD'dan daha büyüktür ve daha gelişmiş yeteneklere sahiptir. MALD, bombardıman uçakları ve savaş uçakları da dahil olmak üzere çeşitli uçaklardan fırlatılmak üzere tasarlanmıştır. Bir radar bozucu ile donatılmıştır ve ayrıca düşman radar sistemlerini şaşırtmak ve bozmak için elektronik sinyaller iletebilir. MALD, TALD'dan daha gelişmiş ve sofistike olup, daha uzun mesafeler ve süreler için uçuş yeteneğine sahiptir.

TALD daha küçük ve daha basit bir tuzak füzedir, MALD ise daha büyük ve daha gelişmiş, daha fazla yeteneğe sahip bir füzedir. Her ikisi de düşman radar sistemlerini aldatmak ve dikkatini dağıtmak için tasarlanmıştır, ancak MALD'nin daha çok yönlü ve etkili olduğu düşünülmektedir.

Daha gelişmiş bir versiyon olduğu için, bu çalışmada Minyatür Hava Konuşlu Tuzak platformu (MALD) kullanılmıştır. Daha düşük bir radar kesit alanı bir savaş uçağından daha düşük bir radar algılama olasılığına sahiptir. Bu durum şüphe uyandırmakta ve MALD ile savaş uçakları arasında ayırım yapılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle, MALD sisteminin emisyonu ve RKA'sı savaş uçağına benzer olmalıdır. Bu çalışmada, faz dizi anten kullanarak MALD sisteminin RKA'sını iyileştirmek için bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntemde, MALD platformunun gövdesinin faz dizi anten ile kaplanması amaçlanmıştır.

Şimdiye kadar radar kesit alanını azaltmak ve görünürlüğü azaltmak için bazı çalışmalar yapılmıştır ancak bu yazıda radar kesit alanını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çünkü savaş uçağının radar izini kopyalayan bir platformun radar kesit alanı arttıkça düşmanı yanıltma oranı artacak ve düşman savaş uçağının yerini tespit etmekte zorlanacaktır.

Analizler, L-S bandı erken uyarı radarlarının frekansından dolayı 1 GHz ile 4 GHz arasında değerlendirilmiştir. Bu tez, havadan fırlatılan minyatür bir füze platformunun radar kesit alanını artırmak için üç anten modelinin analizini sunar ve karşılaştırır. Elde edilen sonuçlara göre, mikroşerit anten yaklaşık 15 dB, dipol anten 8 dB ve papyon anten 5 dB kazanç sağlamaktadır. En fazla kazancı mikroşerit anten sağlamıştır bu nedenle faz dizi anten yapısı için mikroşerit anten seçilmiş ve bu anten füzenin gövdesine konformal olarak yerleştirilmiştir. Sonuçlar, faz dizi mikroşerit antenin füzelerin radar kesit oranını artırdığını göstermektedir. Savaş uçaklarının radar kesit alanı değerlerine bakıldığında yeni nesil uçakların radar kesit alanının düşük, bombardıman uçaklarının ise büyük bir radar kesit alanı olduğu görülmüştür. Elde edilen analiz sonuçlarını güçlendirmek için radar kesit alanı seviyesiyle oynanarak değerler istenilen hedefe yakınlaştırılabilir. Gelecekteki çalışmalarda, tek bir minyatür hava konuşlu yanıltma platformunun tüm askeri savaş uçakları ve bombardıman uçaklarının radar kesit alanını taklit etme kabiliyetini sağlamak üzerine bir çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. C. A. A. A. L. E. Shani, “RF Decoy and Method for Deceiving Radar-Based Missiles,” Nov. 01, 2011
- [2] Kenneth Munson, “Jane’s Unmanned Aerial Vehicles and Targets,” *Jane’s Information Group*, no. 15, 2000.
- [3] Joseph Trevithick, “A-10s Train With Air-Launched Decoys Alongside B-1B Bombers,” *The Warzone*, Nov. 08, 2022.
- [4] S. Genovesi, F. Costa, and A. Monorchio, “Wideband radar cross section reduction of slot antennas arrays,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 62, no. 1, pp. 163–173, 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2287888.
- [5] M. A. Alves, G. G. Peixoto, and M. C. Rezende, “Simulations of the Radar Cross Section of a Generic Air-to-Air Missile Coated with Radar Absorbing Materials.”
- [6] D. K. Barton and S. A. (Sergei A. Leonov, *Radar technology encyclopedia*. Artech House, 1997.
- [7] John. F. S. M. T. T. Eugene F. Knott, *Radar Cross Section*, 2nd Edition. Scitech Publishing, 2004.
- [8] S. S. M. Chung, Y. H. Chou, and Y. C. Chuang, “Radar cross section analysis of stealth fighter design: Key factors and limitations of simulation,” in *International Journal of Electrical Engineering*, Chinese Institute of Electrical Engineering, Dec. 2016, pp. 201–214. doi: 10.6329/CIEE.2016.6.02.
- [9] A. G. Pakfiliz, “Increasing self-protection jammer efficiency using radar cross section adaptation,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 98, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107635.
- [10] L. Mei, Y. Zhao, H. Wang, C. Wang, J. Zhang, and X. Zhao, “Size prediction of radar target based on monostatic radar cross section,” in *2021 IEEE International Conference on Information Communication and Software Engineering, ICICSE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2021, pp. 169–174. doi: 10.1109/ICICSE52190.2021.9404131.

- [11] L. Nicolaescu and T. Oroian, "Radar cross section," in *5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, TELSIKS 2001 - Proceedings of Papers*, IEEE Computer Society, 2001, pp. 65–68. doi: 10.1109/TELSKS.2001.954850.
- [12] A. G. Pakfiliz, *Elektronik Harp*, vol. 1. Ankara: Palme Yayınevi, 2021.
- [13] R. Kantikar, V. Joy, and H. Singh, "Radar Cross Section Analysis of Multi-Layered Resistive Material based Planar/Conformal Radar Absorbing Structures," in *Proceedings of CONECCT 2021: 7th IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/CONECCT52877.2021.9622561.
- [14] H. Singh, "Radar cross section minimization analysis for different target shapes," *Mater Today Proc*, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.10.306.
- [15] G. S. B. Rao, S. Nambari, S. Kota, and K. S. R. Rao, "Monostatic Radar Cross Section Estimation of Missile Shaped Object Using Physical Optics Method," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Sep. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/225/1/012278.
- [16] L. Tuta, R. Lexutan, and C. Moraru, "Time-frequency domain radar cross-section analysis of some simple objects and shapes," in *IEEE International Conference on Communications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. doi: 10.1109/ICComm.2014.6866731.
- [17] F. A. Butt, I. H. Naqvi, and M. Jalil, "Radar cross section analysis for an ogive target," in *Proceedings International Radar Symposium*, IEEE Computer Society, 2014. doi: 10.1109/IRS.2014.6869271.
- [18] L. Tusa, I. Nicolaescu, M. Moni, and M. G. Banciu, "Time-frequency domain Radar Cross Section evaluation of an IAR 99 scaled model aircraft," in *Proceedings of the 2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2015. doi: 10.1109/ECAI.2015.7301211.
- [19] V. Mihai, R. Tamas, and A. Sharaiha, "A Bistatic Method for Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region; A Bistatic Method for Radar Cross Section Measurements in the Fresnel Region," 2019.

- [20] R. Richter and N. A. S. Gomes, "A-4 Skyhawk Aircraft Stealth Capacity against L-Band Radar Based on Dynamic Target Detection," in *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266566.
- [21] W. J. Kerins, "Analysis of Towed Decoys," *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 29, no. 4, pp. 1222–1227, 1993, doi: 10.1109/7.259525.
- [22] S. K. Toppel, "Use of Commercial Off the Shelf GPS Technology to Solve Use of Commercial Off the Shelf GPS Technology to Solve Guidance Problems with the Improved Tactical Air Launched Guidance Problems with the Improved Tactical Air Launched Decoy (ITALD) Decoy (ITALD)," 2004.
- [23] S. Elliott, "Brunswick builds turbojet TALD," *Flight International*, vol. 138, no. 4238, p. 23, 1990.
- [24] "Navy Training System Plan for The Program Title Improved Tactical Air Launched Decoy ADM-141C," 2002.
- [25] "Raytheon to integrate Miniature Air Launched Decoy on Remotely Piloted Aircraft platform," *ENP Newswire*, p. NA, 2013.
- [26] J. K. John Haystead, "Close-in jamming takes off," *Journal of Electronic Defense*, vol. 36, no. 7, pp. 26–33, 2013.
- [27] M. M. R. Hire and M. C. S. Ahire, "A Review on Microstrip Patch Antenna Design and its Applications."
- [28] N. Herscovici, "New considerations in the design of micro strip antennas," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 46, no. 6, pp. 807–812, 1998, doi: 10.1109/8.686766.
- [29] P. Kuravatti Associate Professor, "Comparison of Different Parameters of the Edge Feed and the Inset Feed Patch Antenna," 2018.
- [30] C. Gu, V. Fusco, D. Zelenchuk, S. L. Cotton, and F. Cheng, "Printed Conformal Crossed Dipole Antenna," in *2022 International Workshop on Antenna Technology, iWAT 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 25–28. doi: 10.1109/iWAT54881.2022.9811088.

- [31] P. P. Josefsson Lars, *Conformal Array Antenna Theory and Design*. Wiley-IEEE Press, 2006.
- [32] D. B., C. B. de Paula, and D. C., "Design Techniques for Conformal Microstrip Antennas and Their Arrays," in *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*, InTech, 2013. doi: 10.5772/53019.
- [33] Calif.) IEEE Antennas and Propagation Society. International Symposium (2008 : San Diego, IEEE Antennas and Propagation Society., and Calif.) National Radio Science Meeting (2008 : San Diego, *2008 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting : San Diego, Manchester Grand Hyatt, July 5-12 2008 : final program*. IEEE Xplore, 2008.
- [34] S. Meerabeab, V. Jantarachote, and P. Wounchoum, "Design and Parametric Study of a Suspended Conformal Patch Antenna," in *19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795443.
- [35] J. M. Floch, J.-M. Floc'h, A. El, S. Ahmad, J.-M. Denoual, and H. Rmili, "Design of Printed Dipole Antenna with Reflector and Multi-Directors Millimetric Antennas View project CAPNET View project Design of Printed Dipole Antenna with Reflector and Multi-Directors," 2012.
- [36] C. Electrical Engineering/Electronics, IEEE Thailand Section, IEEE Antennas and Propagation Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 International Symposium on Antennas and Propagation : ISAP 2017 : 30 October - 2 November 2017, Phuket, Thailand*.
- [37] M. Rakibul Islam, "Study and Implementation of Wideband Bow-Tie Antennas Md Rakibul Islam," 2017.
- [38] M. K. A. Rahim, M. Z. A. Abdul Aziz, and C. S. Goh, "Bow-tie microstrip antenna design," in *2005 13th IEEE International Conference on Networks jointly held with the 2005 7th IEEE Malaysia International Conference on Communications, Proceedings*, 2005, pp. 17–20. doi: 10.1109/ICON.2005.1635425.
- [39] Z. B. and A. A. J. Ehmouda, "Steered Microstrip Phased Array Antennas," 2009.

- [40] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, 2nd ed. Wiley-Interscience, 2009.
- [41] K. Liu *et al.*, “Analysis and Investigation on Lightning Electromagnetic Coupling Effects of a Dipole Antenna for a Wireless Base Station,” *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 60, no. 6, pp. 1842–1849, Dec. 2018, doi: 10.1109/TEM.2018.2809513.
- [42] P. Persson and sensorer och system. Tekniska högskolan i Stockholm. Institutionen för signaler, *Analysis and design of conformal array antennas*. Tekniska högsk, 2001.

